

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



**MODELO DIRECTO NO PARAMÉTRICO DE
AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO BASADO
EN REDES NEURONALES**

**PROYECTO FIN DE CARRERA
Ingeniería Técnica Industrial: Mecánica**

21 JUNIO 2012

AULA: 1.0B02

HORA: 10:00

AUTOR: D. FELIPE BORJA MUÑOZ ÁGUILA

TUTORA: DRA. MARÍA JESÚS LOPEZ BOADA

DIRECTOR: D. AHMED KHALIL

MODELO DIRECTO DE AMORTIGUADOR NO PARAMÉTRICO BASADO EN REDES NEURONALES



ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVO	1
1.2 ESTRUCTURA DEL PROYECTO	2
CAPÍTULO 2: LA SUSPENSIÓN DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL	3
2.1 INTRODUCCIÓN	3
2.2 PERCEPCIÓN Y TOLERANCIA DEL CUERPO HUMANO A LAS VIBRACIONES	7
2.3 ELEMENTOS DE LA SUSPENSIÓN	9
2.3.1 Elementos elásticos.....	11
2.3.1.1 Ballestas	11
2.3.1.2 Muelles helicoidales.....	13
2.3.1.3 Barras de torsión.....	15
2.3.2 Barra estabilizadora.....	17
2.3.3 Silentblocks o bushing y cojinetes elásticos	18
2.3.4 Rotulas	20
2.3.5 Mangueta y buje.....	20
2.3.6 Trapecios o brazos de suspensión	21
2.3.7 Varilla de tensión	22
2.3.8 Tirantes de suspensión.....	22
2.3.9 Topes de suspensión	23
2.3.10 Amortiguadores	24
2.3.10.1 Amortiguadores hidráulicos convencionales	29
2.3.10.1.1 Amortiguador bitubo	32
2.3.10.1.2 Amortiguadores monotubo	34
2.4 TIPOS DE SUSENSIONES MECÁNICAS	35
2.4.1 Suspensiones rígidas	35
2.4.2 Suspensión semi-rígida	37
2.4.3 Suspensión independiente	38
2.4.3.1 Suspensión de eje oscilante	39
2.4.3.2 Suspensión de brazos tirados o arrastrados	40
2.4.3.3 Suspensión McPherson	42
2.4.3.4 "Falsa" McPherson.....	44
2.4.3.5 Suspensión de paralelogramo deformable	45
2.4.3.6 Suspensiones Multibrazo o Multilink	46
2.5 SUSENSIONES REGULABLES.....	48
2.5.1 Suspensiones activas.....	48
2.5.2 Suspensiones semiactivas	50
CAPÍTULO 3: FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS.....	54
3.1 INTRODUCCIÓN	54
3.2 MODELADO DEL FLUIDO MAGNETO-REOLÓGICO	55
3.3 PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS	56
3.3.1 Propiedades reológicas.....	56
3.3.2 Propiedades magnéticas.....	57
3.4 APLICACIONES.....	58
CAPÍTULO 4: REDES NEURONALES ARTIFICIALES.....	62
4.1 INTRODUCCIÓN	62
4.2 DEFINICIÓN DE RED NEURONAL ARTIFICIAL	63

MODELO DIRECTO DE AMORTIGUADOR NO PARAMÉTRICO BASADO EN REDES NEURONALES



4.3 ELEMENTOS BÁSICOS QUE COMPOENEN UNA RED NEURONAL	63
4.3.1 <i>Función de entrada</i>	64
4.3.2 <i>Función de activación</i>	65
4.3.3 <i>Función de salida</i>	67
4.4 MODO DE OPERACIÓN	67
4.5 OPERACIONES DE CAPA	68
4.6 OTRAS CONSIDERACIONES	68
4.7 MECANISMOS DE APRENDIZAJE.....	69
4.7.1 <i>Aprendizaje supervisado</i>	69
4.7.2 <i>Aprendizaje no supervisado</i>	71
4.7.3 <i>Aprendizaje on-line y off-line</i>	72
CAPÍTULO 5: ALGORITMO DE APRENDIZAJE BACKPROPAGATION	73
5.1 INTRODUCCIÓN	73
5.2 REGLA DE APRENDIZAJE	74
CAPÍTULO 6: DATOS EXPERIMENTALES, ENTRENAMIENTO DE RED, VALIDACIÓN Y RESULTADOS.....	82
6.1 DATOS EXPERIMENTALES.....	82
6.1.1 <i>Introducción</i>	82
6.1.2 <i>Desarrollo del ensayo</i>	83
6.1.3 <i>Resultados</i>	86
6.2 ENTRENAMIENTO DE LA RED.....	86
6.2.1 <i>Introducción</i>	86
6.2.2 <i>Función de activación</i>	90
6.2.3 <i>Factor de aprendizaje</i>	91
6.2.4 <i>Error de entrenamiento</i>	91
6.2.5 <i>Error de validación</i>	92
6.2.6 <i>Entrenamiento</i>	93
6.2.6.1 Red 4_5_1	93
6.2.6.2 Red 4_10_1	94
6.2.6.3 Red 4_15_1	95
6.2.6.4 Red 4_20_1	96
6.2.6.5 Red 4_25_1	97
6.2.6.6 Red 4_30_1	98
6.2.6.7 Red 4_35_1	99
6.2.6.8 Red 4_40_1	99
6.3 VALIDACIÓN DEL MODELO	101
6.3.1 <i>Datos de validación para la fuerza longitudinal</i>	101
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	103
7.1 CONCLUSIONES	103
7.2 TRABAJOS FUTUROS	104
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
ANEXO A.....	107
A.1. INTRODUCCIÓN: SIMULADOR JAVA-NNS	107
A.2. MANUAL: SIMULADOR JAVA-NNS	108
A.2.1 <i>Crear una red neuronal MLP</i>	108
A.2.2 <i>Editar las unidades (neuronas)</i>	109
A.2.3 <i>Guardar la red creada</i>	111
A.2.4 <i>Crear un fichero con patrones de entrenamiento y otro de Validación</i>	111

MODELO DIRECTO DE AMORTIGUADOR NO PARAMÉTRICO BASADO EN REDES NEURONALES



A.2.5. Entrenar y validar la red	111
A.2.6. Visualizar el error.....	115
A.2.7. Grabar los resultados	115
A.2.8. Analizar nuevos datos	117
A.3. REDES DE BASE RADIAL	118
A.3.1. Crear la red neuronal de RB.....	118
A.3.2. Entrenamiento y validación.....	119

MODELO DIRECTO DE AMORTIGUADOR NO PARAMÉTRICO BASADO EN REDES NEURONALES



ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2: LA SUSPENSIÓN DE UN VEHÍCULO AUTOMOVIL

FIGURA 2. 1 COMPORTAMIENTO LATERAL DE UN VEHÍCULO. A) SOBREVIRADOR B) SUBVIRADOR.....	3
FIGURA 2. 2 DISPOSICIÓN DEL CONJUNTO DE LA SUSPENSIÓN EN UN OPEL MERIVA.....	4
FIGURA 2. 3 TIPOS DE OSCILACIONES	6
FIGURA 2. 4 TIPOS DE OSCILACIONES EN CASOS REALES.....	6
FIGURA 2. 5 PARTES DE UNA SUSPENSIÓN	9
FIGURA 2. 6 INFLUENCIA DE LA DUREZA DEL MUELLE EN LAS OSCILACIONES.	10
FIGURA 2. 7 CONJUNTO DE LA BALLESTA Y FIJACIONES	11
FIGURA 2. 8 UNIÓN DE LA BALLESTA AL BASTIDOR Y EJE DE RUEDA	12
FIGURA 2. 9 BALLESTA POR DEBAJO DEL EJE.....	13
FIGURA 2. 10 MONTAJE TRASVERSAL DE BALLESTA.	13
FIGURA 2. 11 PARTES DE UN RESORTE.....	14
FIGURA 2. 12 DISTINTAS CLASES DE MUELLES	14
FIGURA 2. 13 POSICIONES DEL MUELLE	15
FIGURA 2. 14 BARRA DE TORSIÓN	15
FIGURA 2. 15 TIPOS DE MONTAJE BARRA DE TORSIÓN	16
FIGURA 2. 16 BARRA DE TORSIÓN TRASVERSAL CON MONTAJE MIXTO	16
FIGURA 2. 17 BARRA ESTABILIZADORA	17
FIGURA 2. 18 INCLINACIÓN EN CURVA.....	17
FIGURA 2. 19 CASOS REALES DE INCLINACIÓN EN CURVA.....	17
FIGURA 2. 20 FUNCIONAMIENTO DE LA BARRA ESTABILIZADORA.....	18
FIGURA 2. 21 SILENTBLOCKS	19
FIGURA 2. 22 ROTULAS.....	20
FIGURA 2. 23 MANGUETA DE LA SUSPENSIÓN	21
FIGURA 2. 24 BRAZOS DE SUSPENSIÓN	21
FIGURA 2. 25 SUSPENSIÓN TRASERA DE TIRANTES DEL RED BULL RB5.....	22
FIGURA 2. 26 TIRANTES DE SUSPENSIÓN PULL-ROD Y PUSH- ROD	23
FIGURA 2. 27 TOPE EN SUSPENSIÓN MCPHERSON	23
FIGURA 2. 28 AMORTIGUADOR HIDRÁULICO TELESCÓPICO MODERNO	25
FIGURA 2. 29 A LA IZQUIERDA, FLUJO DE ACEITE A TRAVÉS DEL PASO PERMANENTE. A LA DERECHA, FLUJO DE ACEITE A TRAVÉS DE LAS VÁLVULAS DE APERTURA POR PRESIÓN	26
FIGURA 2. 30 EXPLOSIÓN DEL PISTÓN DE UN AMORTIGUADOR MONOTUBO	27
FIGURA 2. 31 DIAGRAMA FUERZA VELOCIDAD DE UN AMORTIGUADOR REGULABLE.....	28
FIGURA 2. 32 AMORTIGUADOR DE DOBLE TUBO Y MONOTUBO	28
FIGURA 2. 33 ESQUEMA INTERNO DE UN AMORTIGUADOR HIDRÁULICO.....	30
FIGURA 2. 34 AMORTIGUADOR HIDRÁULICO EN COMPRESIÓN Y EXPANSIÓN	31
FIGURA 2. 35 CONSTITUCIÓN DE UN AMORTIGUADOR BITUBO	32
FIGURA 2. 36 ESQUEMA SIMPLIFICADO DE UN AMORTIGUADOR MONOTUBO	34
FIGURA 2. 37 SUSPENSIÓN RÍGIDA	35
FIGURA 2. 38 SUSPENSIÓN RÍGIDA PARA EJE TRASERO PROPULSOR.....	36
FIGURA 2. 39 BARRA PANHARD, INCORPORADA EN UN VEHÍCULO TODOTERRENO.....	36
FIGURA 2. 40 ESQUEMA SUSPENSIÓN DE DION	37
FIGURA 2. 41 PARTES SUSPENSIÓN SEMIRRÍGIDA.....	37
FIGURA 2. 42 SUSPENSIÓN SEMIRRÍGIDA HONDA HR-V	38
FIGURA 2. 43 SUSPENSIÓN INDEPENDIENTE	38
FIGURA 2. 44 ESQUEMA DE UNA SUSPENSIÓN DE EJE OSCILANTE	39
FIGURA 2. 45 ESQUEMA DE EJE OSCILANTE Y COMPENSADO	40
FIGURA 2. 46 SISTEMA DE BRAZO ARRASTRADO	40
FIGURA 2. 47 SISTEMA DE BRAZO SEMI-ARRASTRADO	41

MODELO DIRECTO DE AMORTIGUADOR NO PARAMÉTRICO BASADO EN REDES NEURONALES



FIGURA 2. 48 SUSPENSIÓN DE BRAZOS TIRADOS CON DOS BARRAS DE TORSIÓN	41
FIGURA 2. 49 SUSPENSIÓN DE BRAZO TIRADO CON CUATRO BARRAS DE TORSIÓN	42
FIGURA 2. 50 ESQUEMA DE UN SISTEMA DE SUSPENSIÓN McPHERSON	42
FIGURA 2. 51 DESPIECE SUSPENSIÓN McPHERSON	43
FIGURA 2. 52 FALSA McPHERSON	44
FIGURA 2. 53 SUSPENSIÓN DE PARALELOGRAMO DEFORMABLE	45
FIGURA 2. 54 SUSPENSIÓN MULTIBRAZO DELANTERA	47
FIGURA 2. 55 SUSPENSIÓN MULTIBRAZO TRASERA	47
FIGURA 2. 56 ESQUEMA DE SUSPENSIÓN PASIVA PARA UNA RUEDA	48
FIGURA 2. 57 ESQUEMA DE LAS SUSPENSIONES ACTIVAS	49
FIGURA 2. 58 JAGUAR XKR CON SISTEMA CATS	49
FIGURA 2. 59 ESQUEMA DE LAS SUSPENSIONES SEMIACTIVAS	50
FIGURA 2. 60 CADILLAC SEVILLE STS EQUIPADO CON EL SISTEMA MAGNERIDE DE DELPHI	52
FIGURA 2. 61 MAGNETIZACIÓN DEL FLUIDO DEL MAGNERIDE	52
FIGURA 2. 62 SISTEMA DE CONTROL DELPHI	53

CAPÍTULO 3: FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS

FIGURA 3. 1 FORMACIÓN DE CADENAS PARALELAS AL CAMPO MAGNÉTICO	54
FIGURA 3. 2 MODELO VISCO-PLÁSTICO DE LOS FLUIDOS MR	55
FIGURA 3. 3 COMPORTAMIENTO PARTÍCULAS CON Y SIN CAMPO MAGNÉTICO	57
FIGURA 3. 4 FUTURO ROBOT ARTICULADO CON FLUIDO MAGNETO-REOLÓGICO	58
FIGURA 3. 5 AMORTIGUADOR DE FLUIDO MAGNETO-REOLÓGICO RHEONETIC RD-1001-4	59
FIGURA 3. 6 AMORTIGUADOR SÍSMICO RHEONETIC MRD-9000	60
FIGURA 3. 7 PUENTE DE LAGO DONG TING EN CHINA	60
FIGURA 3. 8 PRÓTESIS DE PIERNA DISEÑADA POR BIEDERMAN MOTECH	61

CAPÍTULO 4: REDES NEURONALES ARTIFICIALES

FIGURA 4. 1 MODELO DE UNA NEURONA BIOLÓGICA	62
FIGURA 4. 2 ESQUEMA DE UNA RED NEURONAL COMPLETA	64
FIGURA 4. 3 FUNCIÓN DE ACTIVACIÓN LINEAL	65
FIGURA 4. 4 FUNCIÓN DE ACTIVACIÓN TIPO SIGNO	65
FIGURA 4. 5 FUNCIÓN DE ACTIVACIÓN TIPO ESCALÓN	66
FIGURA 4. 6 FUNCIÓN DE ACTIVACIÓN LOGÍSTICA	66
FIGURA 4. 7 FUNCIÓN DE ACTIVACIÓN TANGENTE HIPERBÓLICA	66
FIGURA 4. 8 FUNCIONAMIENTO DE UNA NEURONA DE LA RED	67
FIGURA 4. 9 INFLUENCIA DE LA SALIDA DE LA NEURONA N_j EN LA ENTRADA DE LA NEURONA N_i	70

CAPÍTULO 5: ALGORITMO DE APRENDIZAJE BACKPROPAGATION

FIGURA 5. 1 ESTRUCTURA DE UNA RED	78
FIGURA 5. 2 COMPONENTES DE UNA NEURONA	78
FIGURA 5. 3 REPARTO DE PESOS EN LA PRIMERA CAPA DE NEURONAS	79
FIGURA 5. 4 REPARTO DE PESOS EN LA SEGUNDA CAPA DE NEURONAS	79
FIGURA 5. 5 SEÑAL DE SALIDA	80
FIGURA 5. 6 DIFERENCIA ENTRE LA SALIDA OBTENIDA Y LA SALIDA DESEADA	80
FIGURA 5. 7 PROPAGACIÓN DEL ERROR EN LA CAPA INTERMEDIA	80
FIGURA 5. 8 PROPAGACIÓN DEL ERROR EN LA PRIMERA CAPA DE LA RED	80
FIGURA 5. 9 MODIFICACIÓN DE LOS PESOS EN LA CAPA DE ENTRADA	81
FIGURA 5. 10 MODIFICACIÓN DE LOS PESOS EN LA CAPA INTERMEDIA	81
FIGURA 5. 11 PROPAGACIÓN DEL ERROR HASTA LA CAPA DE SALIDA	81

MODELO DIRECTO DE AMORTIGUADOR NO PARAMÉTRICO BASADO EN REDES NEURONALES



CAPÍTULO 6: DATOS EXPERIMENTALES, ENTRENAMIENTO DE RED, VALIDACIÓN Y RESULTADOS

FIGURA 6. 1 MÁQUINA DE ENSAYOS	82
FIGURA 6. 2 CILINDRO HIDRÁULICO Y SONDA DE FUERZA.....	83
FIGURA 6. 3 POTENCIÓMETRO.....	84
FIGURA 6. 4 SONDA LASER DE TEMPERATURA	84
FIGURA 6. 5 CURVA EXPERIMENTAL AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO FUERZA VS DESPLAZAMIENTO.....	85
FIGURA 6. 6 CURVA EXPERIMENTAL AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO FUERZA VS VELOCIDAD	85
FIGURA 6. 7 RED 4_5_1.....	87
FIGURA 6. 8 RED 4_10_1.....	87
FIGURA 6. 9 RED 4_15_1.....	88
FIGURA 6. 10 RED 4_20_1.....	88
FIGURA 6. 11 PATRÓN DE CUATRO ENTRADAS Y UNA SALIDA: A) ENTRENAMIENTO, B) VALIDACIÓN	89
FIGURA 6. 12 REPRESENTACIÓN DE UNA PORCIÓN DE LOS DATOS TOTALES USADOS PARA ENTRENAR Y VALIDAR.....	90
FIGURA 6. 13 EVOLUCIÓN DE ERROR SSE FRENTE A DISTINTOS FACTORES DE APRENDIZAJE	91
FIGURA 6. 14 ERRORES RED4_5_1	94
FIGURA 6. 15 ERRORES RED4_10_1	95
FIGURA 6. 16 ERRORES RED4_15_1	96
FIGURA 6. 17 ERRORES RED4_20_1	97
FIGURA 6. 18 ERRORES RED4_25_1	98
FIGURA 6. 19 ERRORES RED4_30_1	98
FIGURA 6. 20 ERRORES RED4_35_1	99
FIGURA 6. 21 ERRORES RED4_40_1	100
FIGURA 6. 22 DIFERENCIA ENTRE LA SALIDA REAL Y LA DESEADA	102
FIGURA 6. 23 ERROR DE ENTRENAMIENTO	102

ANEXO A

FIGURA A. 1 INTERFAZ GRÁFICO JAVANNS	107
FIGURA A. 2 CREAR CAPAS DE LA RED.....	108
FIGURA A. 3 RED NEURONAL CON CAPA DE ENTRADA, SALIDA Y TRES INTERMEDIAS	109
FIGURA A. 4 CREACIÓN DE CONEXIONES ENTRE CAPAS DE LA RED.....	109
FIGURA A. 5 EDITAR NEURONAS.....	110
FIGURA A. 6 CAMBIAR NOMBRE DE LAS NEURONAS	110
FIGURA A. 7 FICHERO CON PATRONES DE ENTRENAMIENTO Y VALIDACIÓN.....	111
FIGURA A. 8 INICIALIZACIÓN DE LOS PESOS DE FORMA ALEATORIA.....	112
FIGURA A. 9 TOPOLOGICAL ORDER	112
FIGURA A. 10 SELECCIÓN DE PATRONES DE ENTRENAMIENTO Y VALIDACIÓN CARGADOS.....	113
FIGURA A. 11 PARÁMETROS USADOS EN EL ALGORITMO <i>BACKPROPAGATIONMOMENTUM</i>	113
FIGURA A. 12 VALORES USADOS POR DEFECTO	114

MODELO DIRECTO DE AMORTIGUADOR NO PARAMÉTRICO BASADO EN REDES NEURONALES



ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 3: FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS

TABLA 3. 1 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS MR	58
--	----

CAPÍTULO 6: DATOS EXPERIMENTALES, ENTRENAMIENTO DE RED, VALIDACIÓN Y RESULTADOS

TABLA 6. 1 RANGOS DE AMPLITUD, FRECUENCIA Y CORRIENTE	84
TABLA 6. 2 RESULTADOS ENTRENAMIENTO RED4_5_1.....	93
TABLA 6. 3 RESULTADOS ENTRENAMIENTO RED4_10_1.....	94
TABLA 6. 4 ERROR ENTRENAMIENTO RED 4_15_1	95
TABLA 6. 5 ERROR ENTRENAMIENTO RED4_20_1.....	96
TABLA 6. 6 ERROR ENTRENAMIENTO RED4_25_1.....	97
TABLA 6. 7 ERROR ENTRENAMIENTO RED4_30_1.....	98
TABLA 6. 8 ERROR ENTRENAMIENTO RED4_35_1.....	99
TABLA 6. 9 ERROR ENTRENAMIENTO RED4_40_1.....	100
TABLA 6. 10 ERRORES DE ENTRENAMIENTO Y VALIDACIÓN PARA LAS DISTINTAS RED	101

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

El sistema de suspensión constituye una de las partes más importantes de un vehículo en cuanto a seguridad y confort se refiere.

Las funciones principales de un sistema de suspensión son la de absorber las irregularidades del terreno y la de mantener el contacto del neumático con la calzada evitando, con ello, la pérdida de adherencia.

Hoy en día se están realizando numerosas investigaciones para mejorar la respuesta del sistema de suspensión. Dichas investigaciones se centran en la incorporación de elementos que pueden variar sus propiedades de amortiguación o las del sistema (suspensiones activas).

Una de las principales líneas de investigación son los fluidos magneto-reológicos, que dan nombre a este tipo de amortiguadores, se caracterizan por su cambio de densidad en presencia de un campo magnético. Esto permite variar la dureza del amortiguador en cada momento para adaptarse mejor a las condiciones del terreno y al tipo de conducción.

1.1 Objetivo

El objetivo de este Proyecto Fin de Carrera es el de desarrollar un modelo de amortiguador magneto-reológico basado en redes neuronales que prediga su comportamiento no lineal e histerético.

Se pretende encontrar el algoritmo adecuado para relacionar amplitud, frecuencia y corriente con la fuerza; para ello se dispone de una serie de datos de partida con los que se procederá de la siguiente forma:

- Análisis de los datos obtenidos en los ensayos experimentales.
- Diseño de la red neuronal artificial con una única capa oculta de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 y 40 nodos.
- Construcción de los patrones de aprendizaje necesarios para el entrenamiento de las redes.
- Entrenamiento de las redes neuronales artificiales.
- Validación de los resultados obtenidos.

1.2 Estructura del Proyecto

Este proyecto se divide en 8 capítulos siendo el primero de ellos la presente Introducción.

En el capítulo 2 “La suspensión de un vehículo automóvil”, se explica el papel que desempeña el sistema de suspensión, los elementos que lo componen y los tipos de suspensiones y como afectan las vibraciones al cuerpo humano en función de la frecuencia.

En el capítulo 3 “Fluidos magneto-reológicos”, se explica qué es un fluido magneto-reológico, cuáles son sus propiedades y algunas de sus aplicaciones en el mundo de la ingeniería.

En el capítulo 4 “Redes neuronales artificiales”, se explica detalladamente que es una red neuronal y como funciona, los elementos que la componen y los mecanismos de aprendizaje.

En el capítulo 5 “Aprendizaje *backpropagation*”, explicaremos el algoritmo de aprendizaje *backpropagation* ya que será el empleado, como se verá en el capítulo 6, para el entrenamiento de la red neuronal al ser el que mejor se adapta a nuestro estudio.

En el capítulo 6 “Resultados experimentales, entrenamiento de red, validación y resultados” se explican los resultados experimentales obtenidos del ensayo, el entrenamiento de la red y la validación de los resultados.

En el capítulo 7 “Conclusiones y trabajos futuros”, se describen las conclusiones a las que se ha llegado tras el entrenamiento de la red y las posibles mejoras para la realización de estudios futuros.

El último capítulo está dedicado al conjunto de referencias bibliográficas empleadas.

Al final del presente proyecto se incorpora el “Anexo A”, que es una breve guía de uso del programa JavaNNS.

CAPÍTULO 2: LA SUSPENSIÓN DE UN VEHÍCULO AUTOMÓVIL

2.1 Introducción

Las vibraciones mecánicas indeseadas están presentes en la mayoría de las maquinas y generan problemas. En el sector automotriz tanto las vibraciones generadas por los elementos giratorios del motor como por las irregularidades de la vía por la que circula el vehículo, generan oscilaciones que afectan a la carrocería y a los ocupantes del mismo. Estas oscilaciones son atenuadas mediante el sistema de suspensión.

En la actualidad se están llevando a cabo un gran número de investigaciones para mejorar el sistema de suspensión mediante la incorporación de elementos que pueden variar sus propiedades de amortiguación o de rigidez (suspensiones semiactivas), donde cada vez están cobrando más importancia los amortiguadores magneto-reológicos debido a su gran rapidez de respuesta, que es del orden de milisegundos o mediante actuadores que introducen una fuerza al sistema (suspensiones activas).

El comportamiento en carretera de un vehículo viene determinado en gran parte por el tipo de suspensión que lleve, por ejemplo, es posible variar la característica del coche, subvirador o sobrevirador, como se muestra en la figura 2.1.

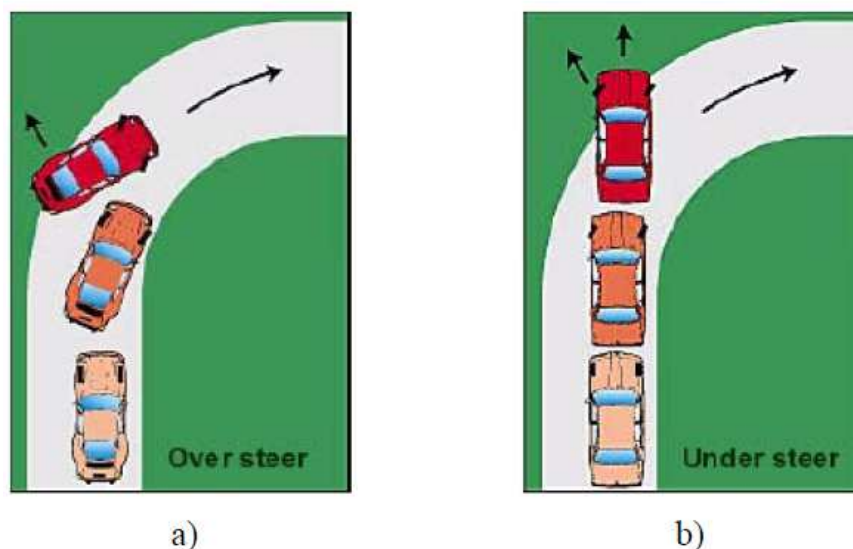


Figura 2. 1 Comportamiento lateral de un vehículo. a) Sobrevirador b) Subvirador

El sistema de suspensión del vehículo (figura 2.2) constituye una de las partes más importantes de un vehículo en cuanto a seguridad y confort se refiere. Está formado por el conjunto de un elemento elástico y otro de amortiguación.

La misión del elemento elástico es la de absorber las desigualdades del terreno sobre el que se desplaza, a la vez que mantiene las ruedas en contacto con el pavimento, proporcionando a los pasajeros un adecuado confort y seguridad en marcha y protegiendo la carga y las piezas del automóvil, también evita una inclinación excesiva de la carrocería durante los virajes y en la parte delantera durante el frenado. Si el peso del automóvil descansara sobre un muelle sin amortiguador este continuaría sacudiéndose hacia arriba y hacia abajo después de una sacudida y se detendría de forma gradual por la fricción en el sistema de suspensión. Los muelles en espiral poseen muy poca fricción por lo que las oscilaciones tardarían en absorberse.

Un automóvil bajo sacudimiento es muy difícil de controlar, porque el peso efectivo sobre las llantas cambia de forma permanente, por ello se instalan los amortiguadores sobre un sistema de suspensión para detener rápidamente la oscilación natural de los muelles del automóvil, lo que mejora el desplazamiento, control y manejo [1].



Figura 2. 2 Disposición del conjunto de la suspensión en un Opel Meriva

Se puede decir que las funciones básicas del sistema de suspensión son [2]:

- Absorber las desigualdades del terreno, aislando a la carrocería de las irregularidades de la carretera.
- Mantener la posición de los neumáticos y la geometría de la dirección en perfecto estado de funcionamiento respecto a la superficie de la carretera (control de dirección del vehículo).
- Reaccionar a las fuerzas de control que se transmiten desde las ruedas: fuerzas longitudinales (aceleración y frenado), fuerzas laterales (en el giro), y pares de dirección y frenado.
- Resistir el balanceo de la carrocería.
- Soportar la carga del vehículo.
- Mantener la altura óptima del vehículo.

Estas funciones se obtienen con la combinación de los neumáticos, la elasticidad de los asientos, y el sistema elástico de suspensión.

Para las pequeñas irregularidades de la carretera, los neumáticos son los encargados de absorber las vibraciones, pero, su misión principal es la garantizar la adherencia a la carretera y una marcha silenciosa del vehículo.

Cuando las irregularidades de la carretera son grandes, entra en acción el sistema de suspensión elástica generando oscilaciones en las ruedas, cuanto más blando sea el sistema y más pronunciadas las irregularidades del terreno mayores serán las oscilaciones. Las oscilaciones generadas por el sistema de suspensión deben ser amortiguadas rápidamente para asegurar el contacto de las ruedas con el terreno [3].

Se pueden diferenciar tres tipos de oscilaciones (figura 2.3 y 2.4) producidas por las irregularidades del terreno o por una conducción defectuosa, y a una carga lateral [4]:

- Oscilaciones de empuje, que son producidas al pasar sobre un terreno ondulado.
- Oscilaciones de cabeceo, producidas en los frenados bruscos.
- Oscilaciones de bamboleo, producidas al tomar las curvas a alta velocidad.

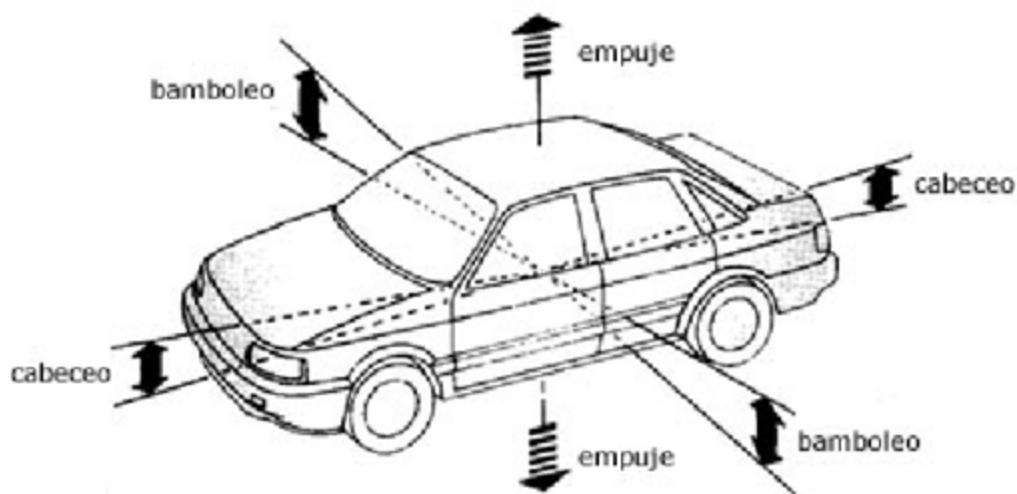


Figura 2. 3 Tipos de oscilaciones



Empuje



Cabeceo



Bamboleo

Figura 2. 4 Tipos de oscilaciones en casos reales

Los automóviles viajan a elevada velocidad, y por ello están sometidos a un amplio espectro de vibraciones. Estas vibraciones se transmiten a los pasajeros de forma táctil, visual o audible. [2]

El término *vibraciones* se usa normalmente en referencia a vibraciones táctiles y visuales, mientras que las vibraciones audibles se definen como *ruido*. El espectro de vibraciones se puede dividir de acuerdo con la frecuencia y clasificarlas como vibraciones (0-25 Hz) y ruido (25-2500 Hz). Para entender el entorno de vibración

del vehículo hay que analizar las fuentes de excitación de las vibraciones, la respuesta del vehículo, la percepción humana y tolerancia a las vibraciones, ya que el ambiente generado por las vibraciones es uno de los criterios más importantes por lo que la gente juzga el diseño y la calidad de construcción del vehículo.

Si solo se tienen en cuenta las frecuencias verticales, la gama existente puede ser dividida en tres tipos:

- 1 – 3 Hz: Correspondiente a las frecuencias naturales de la carrocería.
- 5 – 40 Hz: Frecuencias de oscilación de las masas no suspendidas (generalmente entre 10 y 20 Hz).
- 40 – 250 Hz: Oscilaciones producidas en las masas no suspendidas, debidas a las vibraciones naturales en los neumáticos.

Existen múltiples fuentes de excitación por las que se originan las vibraciones en el vehículo, estas fuentes pueden dividirse en dos grandes grupos:

- *Ajenas al vehículo o indirectas*: son las que se transmiten a la masa suspendida a través de las masas no suspendidas y cuyo principal exponente son las irregularidades por donde tiene que desplazarse el vehículo.
- *Propias del vehículo o directas*: son las ejercidas sobre la masa suspendida por elementos contenidos o apoyados en ella, es decir, son fuentes de excitación de vibraciones que están incorporadas al propio vehículo y que surgen principalmente de componentes giratorios o rotativos del mismo, como son los conjuntos llantas/neumáticos, el sistema de tracción/transmisión, el motor y las acciones aerodinámicas.

2.2 Percepción y tolerancia del cuerpo humano a las vibraciones

Existen muchos estudios e investigaciones realizadas para determinar el rango de frecuencias de vibraciones a las que el cuerpo humano responden con síntomas de fatiga, malestar, etc. al conducir o circular en un vehículo [2].

Se debe tener en cuenta que existe el riesgo de que alguna zona del cuerpo entre en resonancia con la frecuencia de excitación.

El cabeceo produce sensación de náuseas y alteraciones en el laberinto auditivo que modifica el sentido del equilibrio. Si el aparato vestibular y el líquido coclear del oído interno están sometidos de forma continua a aceleraciones lineales y/o angulares de frecuencias entre 0.5 y 0.75 Hz, se produce vértigo y mareo.

Las frecuencias de 5 - 6 Hz causan fatiga general, debida a la resonancia de los músculos.

Los objetos de la región visceral se ven afectados por frecuencias entre 5 y 7 Hz.

La entrada en resonancia del diafragma (4-8 Hz) o la cara frontal del tórax (10-50 Hz) produce dificultades respiratorias.

La cabeza y el cuello son muy sensibles a las vibraciones que varían entre los 18 y 20 Hz, y las frecuencias del orden de los 20 Hz son perjudiciales para las vértebras cervicales.

En función de los experimentos realizados, se ha llegado a unas frecuencias de resonancias para otras partes del cuerpo que son:

- Pierna flexionada (sentado): 2 Hz
- Pierna rígida: 20 Hz
- Torso superior (hombro): 4-5 Hz
- Antebrazo: 5-10 Hz
- Columna vertebral (axial): 10-12 Hz
- Brazo: 16-30 Hz
- Mano: 30-50 Hz
- Globo ocular: 20-90 Hz, la vibración transmitida al globo ocular produce una pérdida de agudeza en la visión.

Por lo general las frecuencias verticales más perjudiciales para el ser humano se encuentran entre 20 y 200 Hz, aunque la fatiga aparece más rápidamente cuando las vibraciones están entre 4 y 8 Hz o por debajo de 0.75 Hz, y en ellas pueden aparecer vértigo y mareo. Las frecuencias laterales o longitudinales en el mismo rango también molestan porque alteran el mecanismo de equilibrio del oído interno.

En conclusión se ha determinado que las frecuencias aceptables están entre 1 y 2 Hz, jugando el asiento un papel fundamental en la sensación de confort, cuyos muelles deben tener sus frecuencias naturales alejadas de las sollicitaciones transmitidas al casco de la carrocería, para evitar problemas de resonancias.

2.3 Elementos de la suspensión

En la figura 2.5 se muestra de forma esquemática la composición de la suspensión.

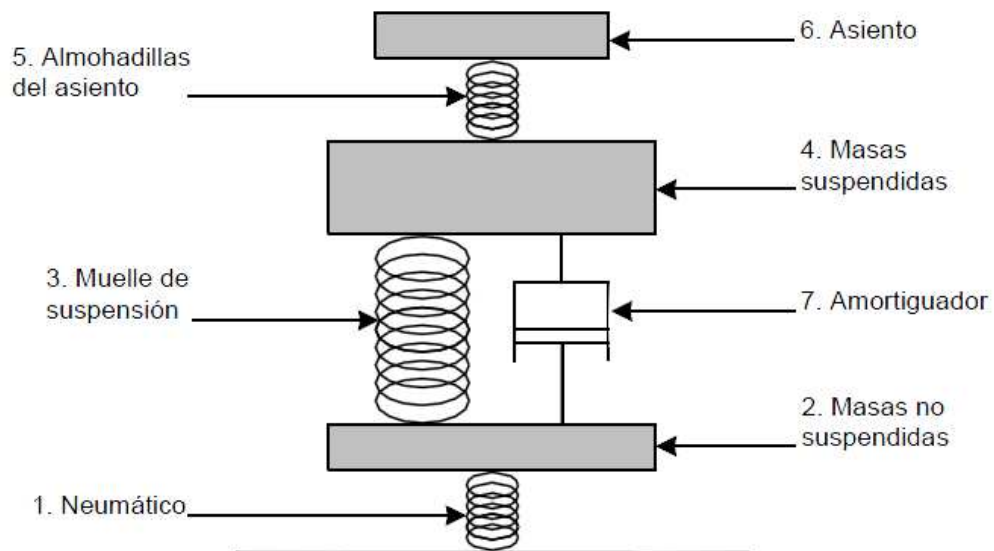


Figura 2. 5 Partes de una suspensión

La *masa no suspendida* 2 está constituida por las ruedas, los frenos, los puentes rígidos, y la parte de las suspensiones, bielas o brazos de empuje y reacción, varillaje de la dirección, etc. que se unen por un extremo al conjunto de la rueda y el otro al bastidor o la carrocería.

El *neumático* 1 se encuentra interpuesto entre las masas no suspendidas y el suelo.

La *masa suspendida* 4 está constituida por el bastidor, el grupo motopropulsor, el diferencial suspendido (en un caso), los mandos de dirección y frenos, la carrocería, los pasajeros, etc. y parte de los elementos citados anteriormente.

Los *muelles* 3 están interpuestos entre la masa no suspendida 2 y la suspendida 4 y los *amortiguadores* 7, son los órganos elásticos de lo que se conoce como sistema de suspensión.

El *almohadillado* 5 y la forma del *asiento* 6 contribuyen con la suspensión a proporcionar comodidad al pasajero.

Las irregularidades pequeñas en las carreteras son absorbidas por los neumáticos sin llegar a afectar la suspensión, así mismo los esfuerzos laterales como las curvas y los esfuerzos longitudinales como aceleraciones y frenadas, son en buena parte atenuadas por la flexibilidad transversal y longitudinal de los neumáticos.

Cuando las irregularidades de la calzada son grandes, los impactos que sufren las ruedas provocan una compresión o una distensión en los muelles de la suspensión,

dependiendo si es un badén o un bache. Cuando el vehículo está estático el sistema se encuentra en equilibrio, el peso del vehículo gravita en los muelles sometiéndolos a compresión. Hay que tomar en consideración que las masas suspendidas, debido a su inercia, tienden a seguir su trayectoria inicial.

Al pasar la rueda sobre un badén la masa suspendida es impulsada hacia arriba, almacenando energía en los muelles debido a la compresión que sufren. A continuación, el muelle se expande y hace subir la carrocería.

Como la energía transmitida a la carrocería (masa suspendida) es la generada por la rueda, y la carrocería tiene un peso muy superior al de las masas no suspendidas, su recorrido vertical será muy inferior al de la rueda. Esta es una de las principales razones por las que el peso de las masas no suspendidas ha de ser el menor posible y casas como Audi han desarrollado nuevas carrocerías híbridas de aluminio.

Después de que la energía acumulada en el muelle se termina, la carrocería baja comprimiendo nuevamente al muelle, que vuelve a acumular energía, y al expandirse vuelve a levantarla, dando origen a un movimiento oscilatorio que continúa hasta ser amortiguado. Lo mismo sucede cuando la rueda cae en un bache, la carrocería baja por falta de sustentación y comprime el muelle, añadiendo a esto el efecto que la rueda produce al subir del bache, luego después se produce el mismo proceso anterior.

Cuando la rueda pasa sobre un obstáculo importante, cuanto más dura sea la suspensión y más deprisa vaya el vehículo el impacto que se transmite a la carrocería es mayor, causando choques desagradables en los pasajeros y sometiendo a los elementos constructivos a esfuerzos mayores a los normales, los cuales pueden llegar a causar la rotura de piezas. Es por ello que los vehículos que están diseñados para circular por terrenos irregulares lleven las suspensiones blandas.

Una suspensión blanda genera frecuencias en la carrocería menores a los 50 Hz mientras que una suspensión dura genera frecuencias mayores a 100 Hz.

En la figura 2.6 se muestra cómo influye la dureza de los muelles en la frecuencia y amplitud de las oscilaciones.

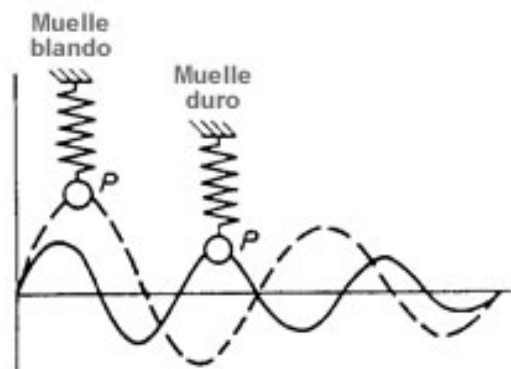


Figura 2. 6 Influencia de la dureza del muelle en las oscilaciones.

2.3.1 Elementos elásticos.

En las suspensiones simples se utilizan como elementos de unión unos resortes de acero elástico de alta calidad en forma de ballesta, muelle helicoidal o barras de torsión.

Estos elementos, al igual que todos los muelles, tienen excelentes propiedades elásticas pero poca capacidad de absorción de energía mecánica, por lo que no pueden ser montados solos en la suspensión y se montan siempre con un amortiguador de doble efecto que frene tanto su compresión como expansión.

2.3.1.1 Ballestas

La ballesta (figura 2.7), actúa como un resorte de flexión, es capaz de soportar esfuerzos de flexión y cortantes y poseen un determinado amortiguamiento propio, debido a la fricción que se produce entre las hojas cuando se flexionan [5].

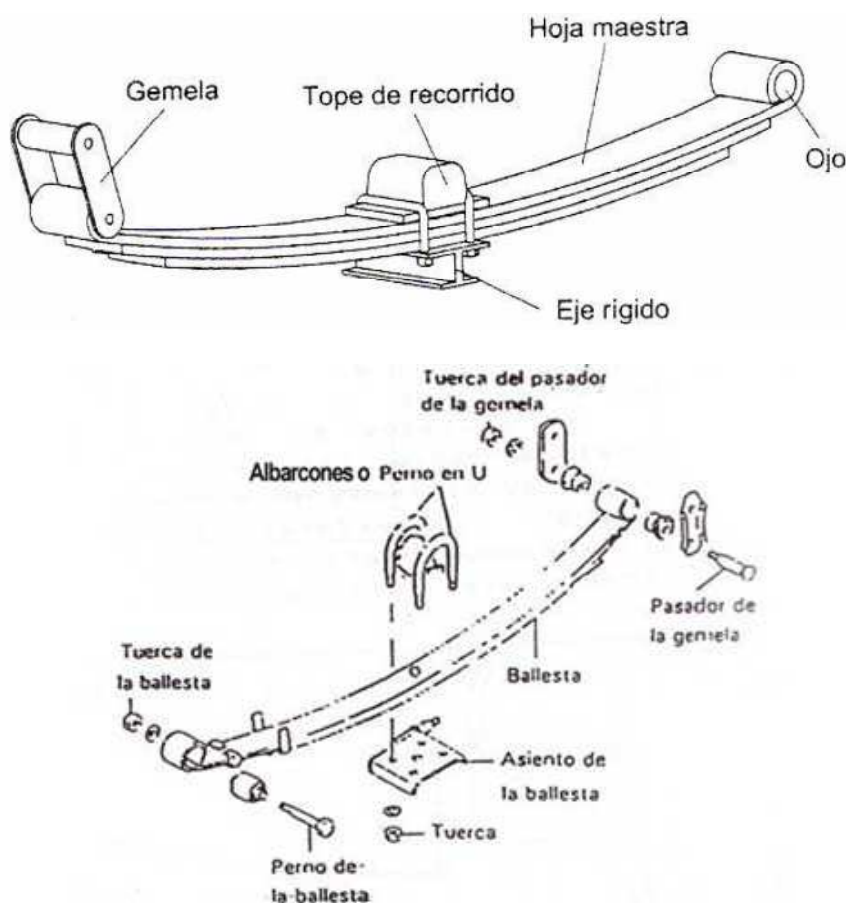


Figura 2. 7 Conjunto de la ballesta y fijaciones

Está constituida por un conjunto de hojas o láminas de acero especial para muelles, las cuales tienen distintos radios de curvatura, adoptando una forma semielíptica.

La hoja superior se denomina *hoja maestra*, sirve de guía de los muelles así como de los ejes, suele ser más larga y gruesa que las demás hojas y en los extremos posee unos terminales llamados *ojos* en los que se montan unos casquillos de bronce para su acoplamiento al soporte del bastidor por medio de unos pernos o bulones.

Las hojas se unen mediante *abrazaderas* y un *eje rígido* (en otros tipos de ballestas las hojas se unen mediante el llamado perno capuchino). Debido a la deformación elástica que se produce en la ballesta no pueden unir de forma rígida al vehículo, se fijan a través de un dispositivo llamado *gemela*.

Las hojas van disminuyendo escalonadamente de longitud desde las superiores (más largas) a las inferiores (más cortas) para conseguir una resistencia a la flexión uniforme en todas las secciones de la ballesta. El número de hojas y el espesor de las mismas están en función de la carga que han de soportar.

Funcionan como los muelles de suspensión, haciendo de enlace entre el eje de las ruedas y el bastidor. Aunque han sido el elemento elástico más utilizado en todo tipo de vehículos, en la actualidad su uso ha quedado reducido a vehículos todo terreno e industriales debido a su gran capacidad de carga.

El montaje de las ballestas puede realizarse de forma longitudinal o transversalmente al sentido del desplazamiento del vehículo:

- **Montaje longitudinal:** se utiliza fundamentalmente en camiones y autocares. Se realiza montando la ballesta con un punto "fijo" en la parte delantera de la misma (según el desplazamiento del vehículo) y otro "móvil", para permitir los movimientos oscilantes de la misma cuando se deforma con la reacción del bastidor (figura 2.8).

El enlace fijo se realiza uniéndola directamente la ballesta (1) al soporte (2) y, la unión móvil, interponiendo entre la ballesta (1) y el bastidor la gemela de ballesta (3).

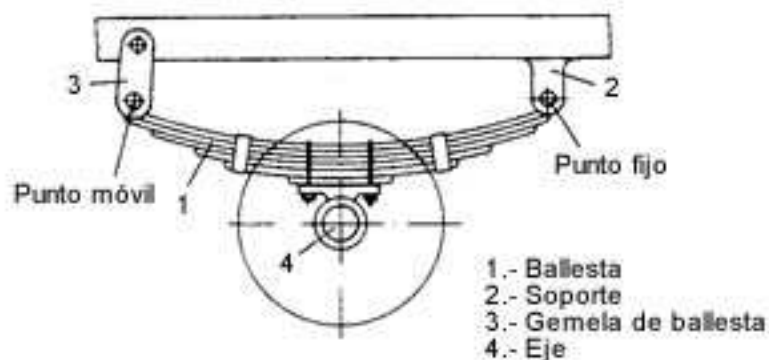


Figura 2. 8 Unión de la ballesta al bastidor y eje de rueda

El montaje de la ballesta sobre el eje (4), puede realizarse con apoyo de la ballesta sobre el eje (figura 2.8) o con el eje sobre la ballesta (figura 2.9); este último montaje permite que la carrocería baje, ganando en estabilidad. La unión se realiza por medio de unas abrazaderas que enlazan la ballesta al eje.

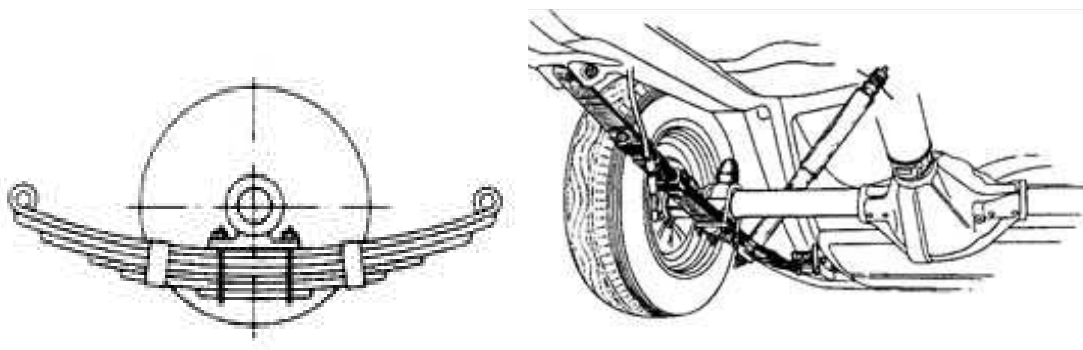


Figura 2. 9 Ballesta por debajo del eje

- **Montaje transversal:** (figura 2.10) se utiliza en turismos, los extremos de la ballesta (1) se unen al puente (2) o brazos de suspensión, con interposición de elementos móviles (3) (gemelas) y la base de la ballesta se une a una traviesa del bastidor o carrocería.

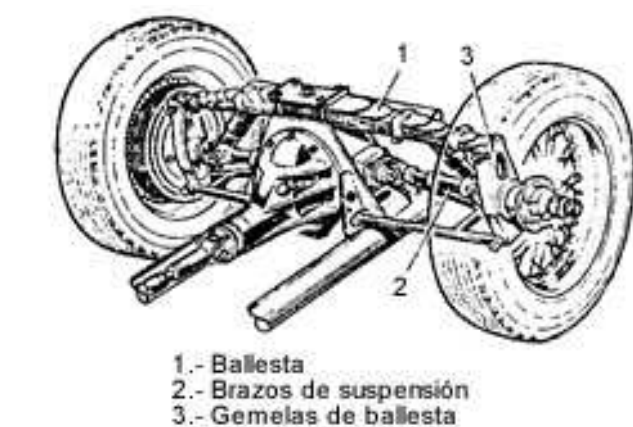


Figura 2. 10 Montaje trasversal de ballesta.

2.3.1.2 Muelles helicoidales

Los muelles o resortes helicoidales son en la actualidad los más utilizados en los automóviles en sustitución de las ballestas. Se emplean tanto en la suspensión delantera como la trasera y ofrecen la ventaja de conseguir una elasticidad blanda debido al gran recorrido del resorte sin apenas ocupar espacio ni sumar peso.

Estos muelles consisten en un arrollamiento helicoidal de acero elástico formado por un hilo de diámetro variable (de 10 a 15 mm) en función de la carga que tienen que soportar. Sus propiedades elásticas dependen del diámetro de la espira, de la distancia entre espiras (paso de la espira), y del diámetro y las propiedades del hilo utilizado. Las últimas espiras son planas para facilitar el asiento del muelle sobre sus bases de apoyo.

La figura 2.11 muestra las partes que caracterizan a un resorte.

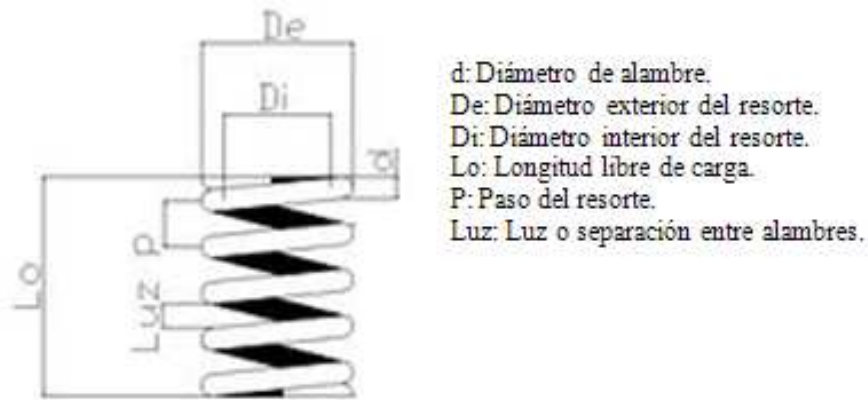


Figura 2. 11 Partes de un resorte

La rigidez del resorte es distinta para cada automóvil; en algunos casos es distinta del lado derecho al izquierdo, por lo que es necesario calcular la compatibilidad. Los muelles están diseñados para soportar carga en dirección longitudinal, y proporcionar al mismo tiempo una conducción comfortable.

Los muelles helicoidales no pueden transmitir esfuerzos laterales, por lo que es necesario el montaje de bielas de empuje lateral y transversal para la absorción de las reacciones de la rueda. Trabajan a torsión, retorciéndose proporcionalmente al esfuerzo que tienen que soportar, acortando su longitud y volviendo a su posición de reposo cuando cesa el efecto que produce la deformación.

Las espiras de un muelle helicoidal no deben hacer contacto entre sus espiras; es decir, que la deformación tiene que ser menor que el paso del muelle por el número de espiras para no alcanzar la longitud de bloque. De ocurrir lo contrario, el efecto del muelle desaparece convirtiéndose en una unión rígida y las sacudidas por la marcha del vehículo se transmiten de forma directa al chasis, lo cual es perjudicial para los integrantes y las piezas del vehículo.

En la figura 2.12 aparecen distintas clases de muelles helicoidales: a. Flexibilidad constante; b, c, d. Flexibilidad variable.

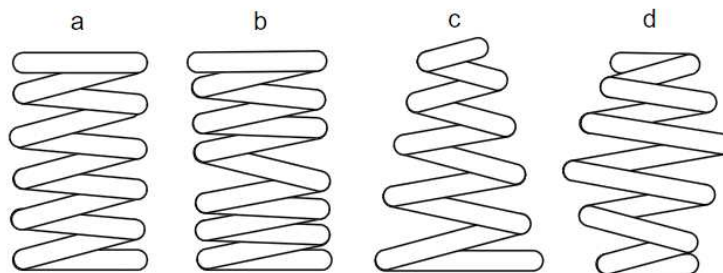


Figura 2. 12 Distintas clases de muelles

Cuando el diámetro de las espiras y el paso son constantes (figura 2.12, detalle a) su flexibilidad es constante. Al hacer mayor el paso en las espiras centrales (figura 2.12 detalle b) se consigue que las espiras externas se flexionen primero, y al aumentar la carga lo hagan las del medio. El mismo efecto se logra con los muelles cónicos (figura 2.12 detalle c), donde primero se comprimen las espiras de mayor diámetro. El muelle en forma de doble cono (figura 2.12 detalle d) tiene las espiras centrales más separadas, siendo este muelle de flexibilidad variable.

En la figura 2.13 puede apreciarse de forma gráfica las tres posiciones del muelle: sin montar, montado en el vehículo y el muelle bajo la acción de la carga.

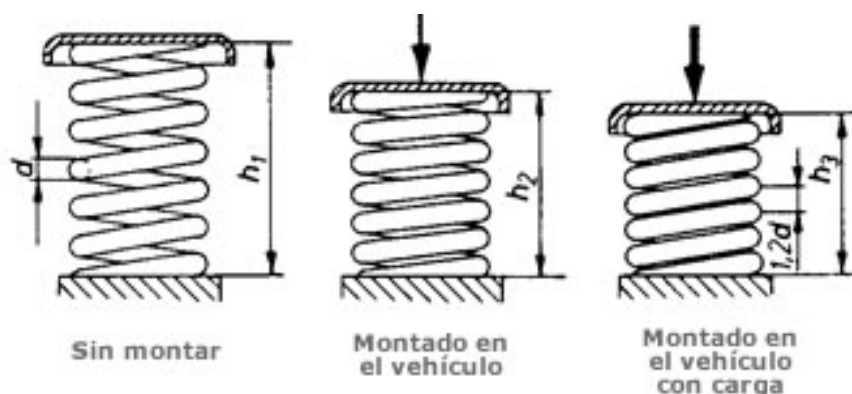


Figura 2. 13 Posiciones del muelle

2.3.1.3 Barras de torsión

El funcionamiento de las barras de torsión está basado en el principio de que si a una varilla de acero elástico sujeta por uno de sus extremos se le aplica por el otro un esfuerzo de torsión, esta varilla tenderá a retorcerse, volviendo a su forma primitiva por su elasticidad cuando cesa el esfuerzo de torsión, como se muestra en la figura 2.14.

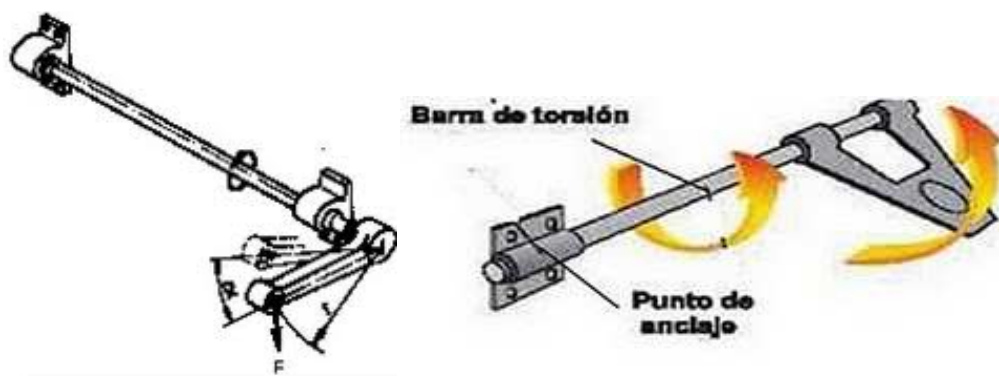


Figura 2. 14 Barra de torsión

En un gran número de turismos modernos se utilizan barras de torsión como elementos elásticos, especialmente en suspensiones independientes.

Se trata de barras hechas de una aleación tratada por calor para el acero, durante la fabricación son estiradas para darles una resistencia contra la fatiga.

Las barras de torsión se montan sobre el vehículo fijando uno de sus extremos al chasis o carrocería, de forma que no pueda girar en su soporte, y en el otro extremo se coloca una palanca solidaria a la barra unida en su extremo libre al eje de la rueda.

Las ruedas suben o bajan por efecto de las desigualdades del terreno, produciendo en la barra un esfuerzo de torsión cuya deformación elástica permite el movimiento de la rueda.

Las barras de torsión se pueden colocar en paralelo al eje longitudinal del bastidor o de forma transversal a lo largo del bastidor (figura 2.15).

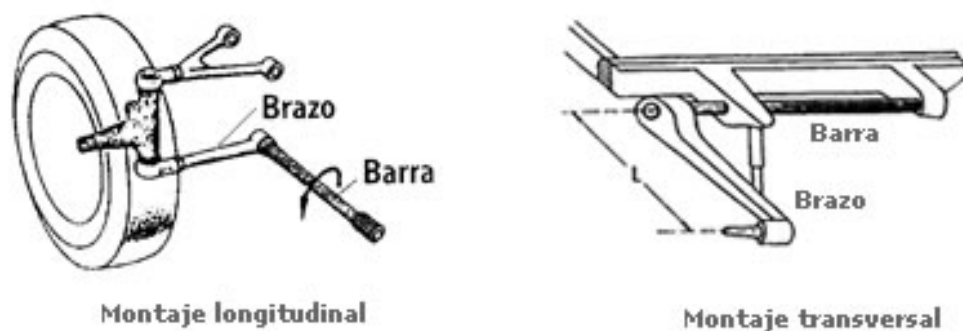


Figura 2. 15 Tipos de montaje barra de torsión

En vehículos con motor y tracción delanteros, se montan de forma mixta colocando en la suspensión delantera las barras de torsión longitudinalmente y transversalmente para la suspensión trasera (figura 2.16).

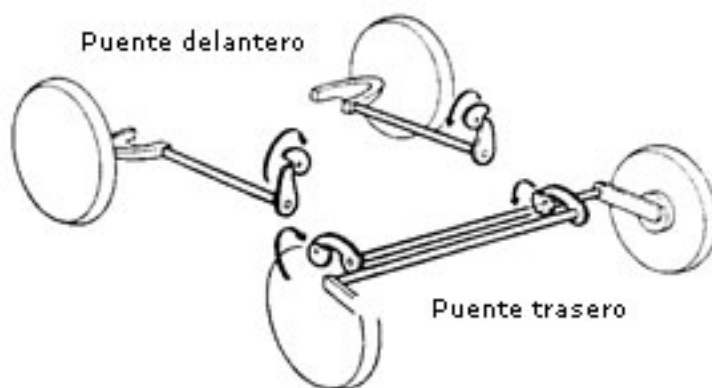


Figura 2. 16 Barra de torsión transversal con montaje mixto

2.3.2 Barra estabilizadora

La barra estabilizadora tiene la forma aproximada de una U ancha (figura 2.17), y es un elemento elástico cuya función es estabilizar la caja del vehículo frente a acciones que produzcan balanceo.

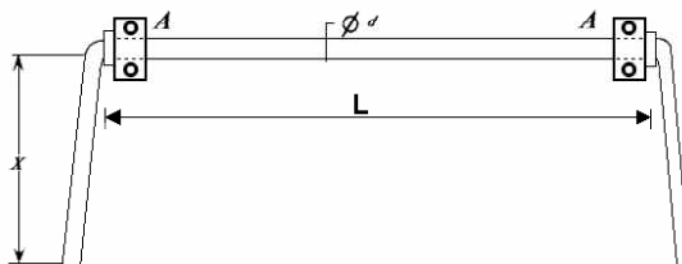


Figura 2. 17 Barra estabilizadora

Las barras estabilizadoras desempeñan la función de contrarrestar la inclinación del vehículo cuando toma las curvas a gran velocidad (figura 2.18 y figura 2.19), también conocido como efecto bamboleo, que hace que se compriman los muelles delantero y trasero que se encuentran a la parte exterior de la curva, y se expandan los muelles que se encuentran en el interior de la misma con peligro de vuelco y con la correspondiente molestia para sus ocupantes por la acción de la fuerza centrífuga.

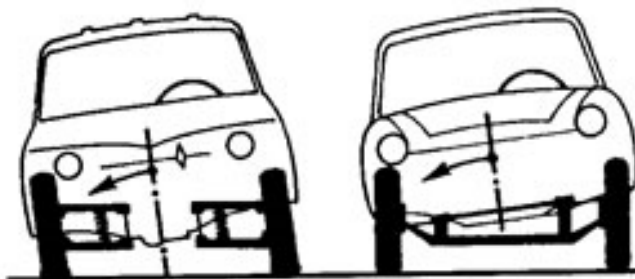


Figura 2. 18 Inclinación en curva



Figura 2. 19 Casos reales de inclinación en curva

Para evitar estos inconvenientes se montan sobre los ejes delantero y trasero las barras estabilizadoras, que consisten en una barra de acero elástico cuyos extremos se fijan a los soportes de suspensión de las ruedas con el objetivo de oponerse al par de vuelco del vehículo.

De esta forma, al tomar una curva, como una de las ruedas tiende a bajar y la otra a subir (figura 2.20), se crea un par de torsión en la barra que absorbe el esfuerzo y se opone a que esto ocurra, e impide, por tanto, que la carrocería se incline a un lado, manteniéndola estable.

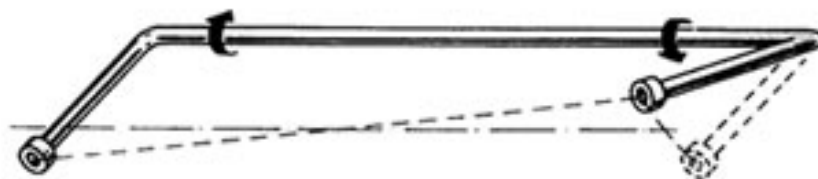


Figura 2. 20 Funcionamiento de la barra estabilizadora

Este mismo efecto se crea cuando una de las ruedas encuentra un bache u obstáculo, creando, al bajar o subir la rueda, un par de torsión en la barra que hace que la carrocería se mantenga en posición horizontal. Si esta irregularidad en la calzada se da cuando se circula en línea recta y en condiciones normales, la acción de la barra es nula.

Con esto se incide de forma directa sobre la adherencia y la seguridad del vehículo. Por consiguiente, la barra estabilizadora, anclada a la carrocería, uniendo ambas ruedas y trabajando a torsión regula el balanceo e intenta mantener la estabilidad.

2.3.3 Silentblocks o bushing y cojinetes elásticos

Los *silentblocks* son unos casquillos de goma que se utilizan en los coches en los puntos donde el chasis del vehículo se une a un componente móvil de la suspensión, como los brazos, la barra estabilizadora, etc., están preparados para absorber el ruido y las vibraciones entre la carretera y el conductor. La goma actúa como una barrera contra el sonido, evitando el ruido y las vibraciones (figura 2.21).

Los silentblocks pueden estar fabricados en nylon o en poliuretano. Por lo general, los coches producidos en serie suelen tener casquillos de nylon ya que son más baratos y fáciles de producir pero su comportamiento es peor. El poliuretano en bruto es 10 veces más caro que la goma y además es más caro de producir y más lento.

Cuando un brazo de suspensión se mueve arriba-abajo, no solamente se mueve en esa dirección sino que describe un arco. Esto significa que, por ejemplo un *silentblock* del brazo de suspensión requiere flexionarse en dos dimensiones al mismo tiempo.

En este mismo ejemplo un *silentblock* metálico permitirá este movimiento como lo haría una goma. Sin embargo, un *silentblock* de nylon permitiría un movimiento arriba-abajo pero el 100% de la carga del arco que debe describir sería transferido al chasis y el brazo. Esto produce que el brazo de suspensión flexione ligeramente y fácilmente puede causar la rotura de este.

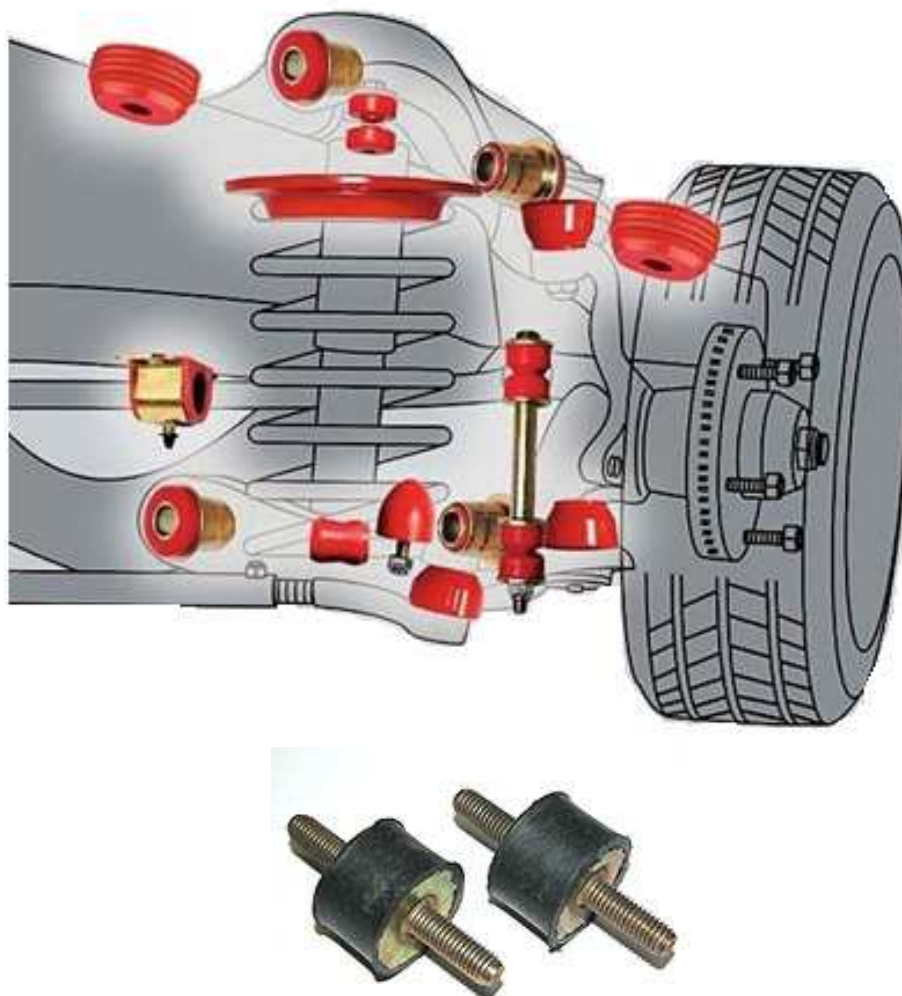


Figura 2. 21 Silentblocks

Los *silentblocks* mejoran el agarre a la carretera de los vehículos así como el rendimiento del chasis controlando la cantidad de flexión en la suspensión no deseada. Con esto se logra que la suspensión esté trabajando exactamente de la manera que fue pensada, los neumáticos tengan una mayor superficie de contacto con la carretera en todo momento por lo tanto mejora la seguridad y las prestaciones.

Suelen montarse a presión o atornillados y se deben sustituir cuando el caucho está deteriorado o existe holgura en la unión.

2.3.4 Rotulas

Las rótulas (figura 2.22), constituyen un elemento de unión y fijación de la suspensión y de la dirección, que permiten el pivotamiento y giro de los extremos de la barra de dirección manteniendo la geometría de las ruedas.



Figura 2. 22 Rotulas

La fijación de las rótulas se realiza mediante tornillos o roscados exteriores o interiores. Su sustitución debe realizarse si existe en estas algún daño, bien sea una deformación debida a un golpe o grietas, o cuando existan holguras.

2.3.5 Mangueta y buje

La mangueta de la suspensión (figura 2.23) es una pieza fabricada con acero o aleaciones que une el buje de la rueda y la rueda a los elementos de la suspensión, tirantes, trapecios, amortiguador, etc. La mangueta se diseña teniendo en cuenta las características geométricas del vehículo.

En el interior del buje se montan los rodamientos o cojinetes que garantizan el giro de la rueda.

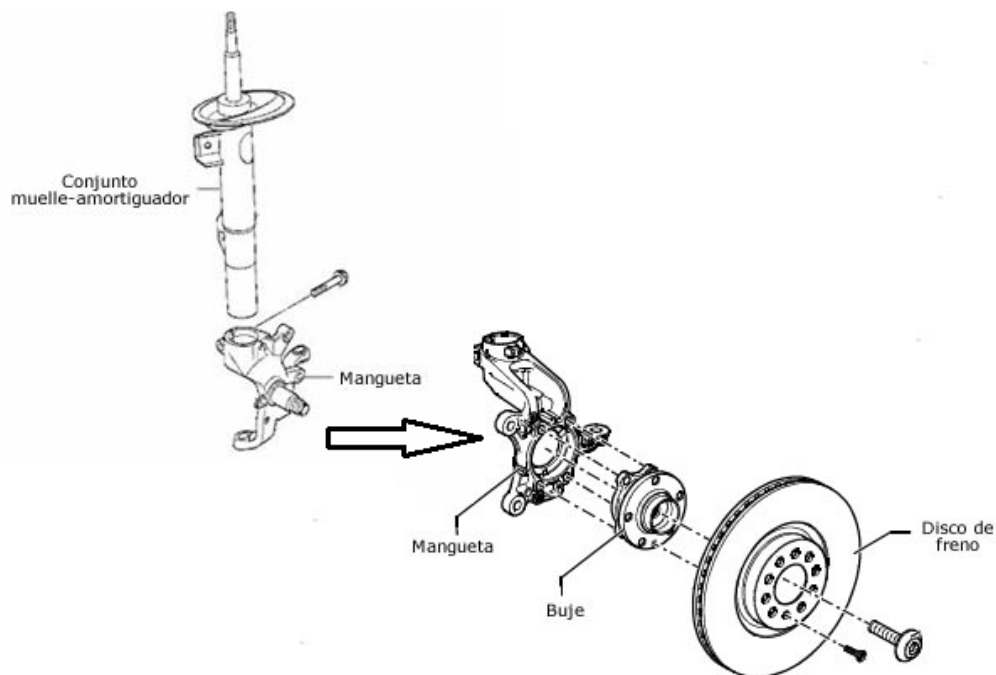


Figura 2. 23 Mangueta de la suspensión

2.3.6 Trapecios o brazos de suspensión

Los brazos de suspensión son, como su nombre indica, brazos articulados fabricados en acero estampado, forjado o de aluminio que soportan al vehículo a través de la suspensión.

Son los acoplamientos que conectan la mangueta y su buje mediante elementos elásticos (*silentblocks*) y elementos de guiado (rótulas) al vehículo, como se muestra en la figura 2.24, soportando los esfuerzos generados por éste en su funcionamiento.

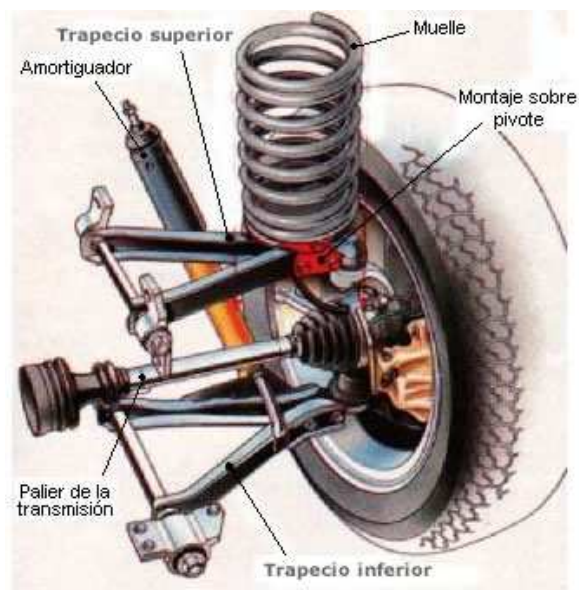


Figura 2. 24 Brazos de suspensión

Los brazos de control lateralmente angostos requieren de una varilla de refuerzo para mantener el control de la rueda hacia delante o hacia atrás.

Si los brazos de control superior e inferior poseen igual longitud la rueda en estado normal se encuentra perpendicular al camino. Al pasar por un obstáculo se mueve ligeramente hacia adentro, lo cual reduce la distancia de las ruedas delanteras, altera la dirección y producen mayor desgaste de las llantas. En el caso de que el brazo superior sea más corto que el inferior, la rueda se inclina hacia adentro, al subir la distancia entre las ruedas no cambia, lo cual produce más control y menos desgaste de las llantas.

Los bujes de los brazos de control están colocados a presión o atornillados en los extremos interiores de los brazos, permitiendo el movimiento oscilatorio del brazo sobre el eje o sobre un perno fijo en el chasis.

La mayoría de bujes son de caucho torsional. Al moverse el brazo hacia arriba o hacia abajo, se deforma el caucho que hay dentro de las corazas de los bujes interiores y exteriores, eliminando la fricción entre las partes de metal.

2.3.7 Varilla de tensión

La varilla de tensión impide que el extremo exterior de un brazo de control se mueva hacia delante o hacia atrás, un extremo está fijo al chasis y el otro extremo al brazo de control en un ángulo de control aproximado de 45°.

Los bujes de caucho en la parte delantera de la varilla de tensión proporcionan el amortiguamiento de los golpes sobre la varilla de tensión.

2.3.8 Tirantes de suspensión

Los tirantes de suspensión son brazos de acero longitudinales o transversales situados entre la carrocería y la mangueta o trapecio que sirven como sujeción de estos y facilitan su guiado. Absorben los desplazamientos y esfuerzos de los elementos de la suspensión a través de los *silentblocks* o cojinetes elásticos montados en sus extremos.

En la figura 2.25 se muestra la suspensión trasera de tirantes de un coche de fórmula 1.

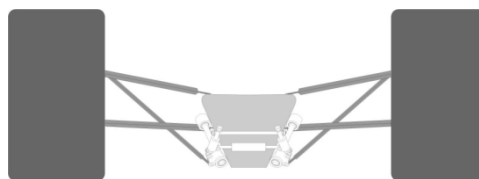


Figura 2. 25 Suspensión trasera de tirantes del Red Bull RB5

Existen dos tipos de disposiciones constructivas (Figura 2.26), *pull-rod* (pull=tirar), que es la de tirantes, que permite que el brazo sea más delgado, pues solo trabaja a tracción y la *push-rod* (push=empujar), cuyo brazo trabaja a compresión, por lo que debe ser más robusta para evitar el pandeo (que se doble).

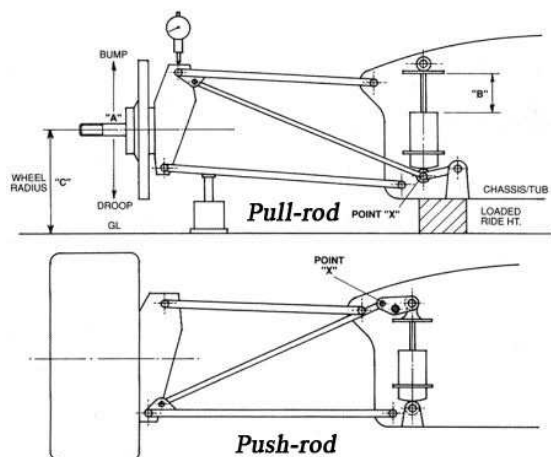


Figura 2. 26 Tirantes de suspensión Pull-rod y Push- rod

2.2.9 Topes de suspensión

Los topes de suspensión pueden ser elásticos o semi-rígidos en forma de taco o en forma de casquillo. Su función es servir de tope para el conjunto de la suspensión, de manera que en una compresión excesiva esta se detenga sin causar daños. El montaje de este elemento es muy diverso dependiendo de la forma del taco. En las suspensiones McPherson (figura 2.27) se monta en el interior del vástago del amortiguador, mientras que en las suspensiones por ballesta se suele montar anclado en la carrocería.

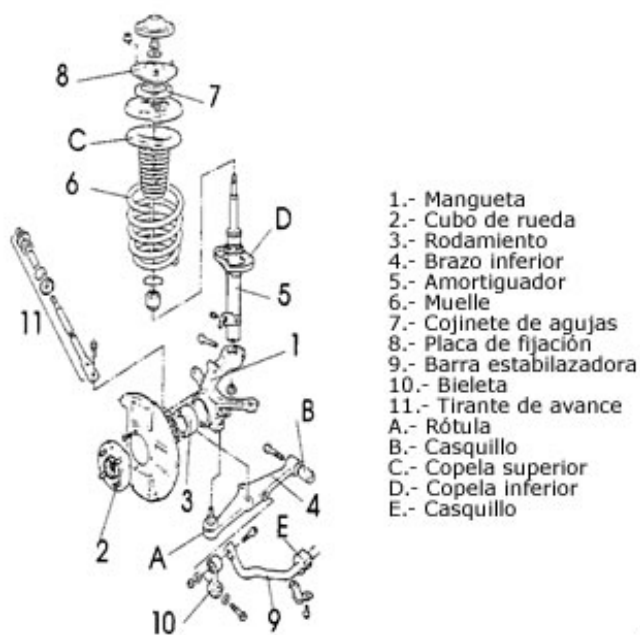


Figura 2. 27 Tope en suspensión Mcpherson

2.3.10 Amortiguadores

El amortiguador es un dispositivo que permite eliminar los efectos de oscilación producidos por el muelle. Al pasar por un bache, los resortes del sistema de suspensión almacenan una cierta cantidad de energía, que posteriormente restituyen a través de los balanceos. De esta forma, los amortiguadores evitan que la carrocería del vehículo oscile continuamente.

El amortiguador transforma en calor la energía que acumula el muelle y disminuye las variaciones de la carga dinámica de las ruedas evitando que estas salten sobre el suelo, proporcionando comodidad y seguridad [6] [7].

Un amortiguador desgastado supone un grave peligro al no impedir el rebote contra el pavimento y permitir de esta forma que las ruedas pierdan el contacto o la capacidad de agarre (adherencia) con el asfalto [8].

El amortiguador, en el ámbito del automóvil, no sólo debe amortiguar movimientos no deseados sino que debe hacerlo de forma óptima y según los criterios de maniobrabilidad y confort. Es por ello que los amortiguadores pueden ser "fijos" y "regulables", los primeros tienen siempre la misma dureza y los segundos pueden variarla dentro de unos márgenes. En los modelos más modernos este reglaje se puede hacer incluso desde el interior del vehículo.

Para disminuir la velocidad de una masa se tiene que hacer una fuerza que se oponga a su velocidad. La fuerza más sencilla que cumple este requisito es la fricción, en dicha fuerza se basa el funcionamiento de los amortiguadores que se usan comúnmente.

Se distinguen tres tipos de fricción:

- Fricción de Coulomb, asociada al movimiento relativo entre partes sólidas en contacto.
- Fricción asociada al movimiento viscoso de un fluido.
- Fricción turbulenta que aparece a partir de la disipación energética como consecuencia del movimiento turbulento del fluido.

Según el tipo de amortiguamiento es conveniente buscar uno u otro tipo de fricción.

Resulta interesante que la fuerza que ofrece el amortiguador sea función de la velocidad, por lo que en los amortiguadores para automóviles, siempre se busca la fricción asociada al movimiento de un fluido ya que dicha fricción es función, entre otras variables, de la velocidad del fluido.

Debido a la utilización como medio un fluido, a este tipo de amortiguadores se los conoce como amortiguadores hidráulicos.

En los primeros vehículos automóviles no se utilizaba ningún tipo de suspensión y no se echaba en falta ya que eran lentos y pesados pero a medida que los vehículos se volvieron más ligeros y rápidos, se dieron cuenta de que la falta de suspensión no sólo producía incomodidad sino que aparecían momentos en los que los neumáticos perdían el contacto con el suelo, perdiéndose tracción y estabilidad.

El neumático al ser el único elemento del vehículo en contacto con el suelo, y por tanto, el único responsable del cambio cinemático del vehículo, se deduce que la principal función del sistema de suspensión es la de asegurar el contacto entre el neumático y el suelo.

Como función secundaria, la suspensión ha de proporcionar el máximo confort posible a los pasajeros y a la carga transportada.

Actualmente los amortiguadores que se han impuesto en el mundo de la industria son los *amortiguadores hidráulicos*. En ellos, la fuerza amortiguadora es función creciente con la velocidad de desplazamiento del pistón del amortiguador. Dentro de los amortiguadores hidráulicos se pueden encontrar los giratorios y los de pistón que apenas se usan [4].

Los amortiguadores hidráulicos que actualmente se utilizan son los de tipo telescópico, como el que se muestra en la figura 2.28, que son los que se van a describir con más detalle y a los que se hará mención de aquí en adelante.



Figura 2. 28 Amortiguador hidráulico telescópico moderno

Los amortiguadores telescópicos se basan en un pistón que trabaja dentro de un cilindro en el que hay aceite. Sobre el pistón existe una serie de orificios y unas válvulas precomprimidas que permiten el paso de aceite de una parte del pistón a otra cuando la presión supera un valor dado. En la figura 2.29 se muestra un esquema del flujo de aceite.

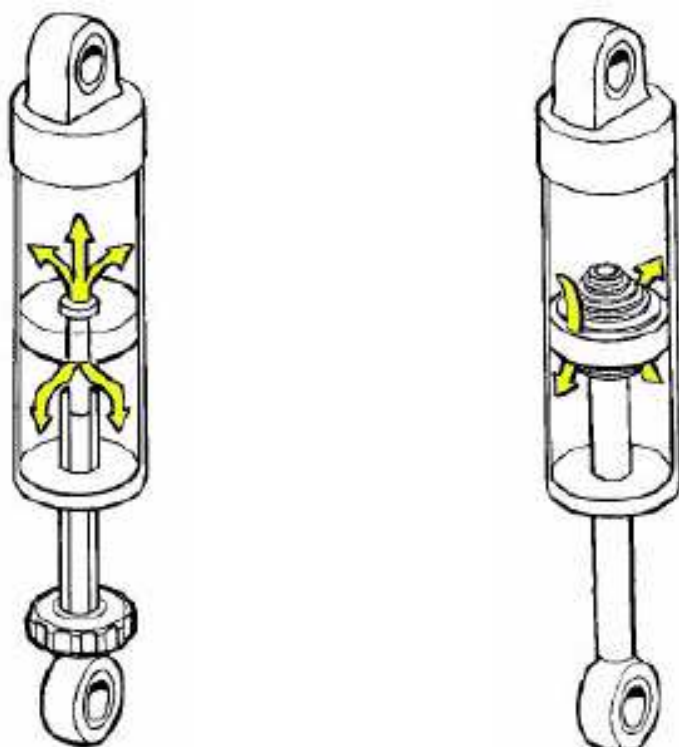


Figura 2. 29 A la izquierda, flujo de aceite a través del paso permanente. A la derecha, flujo de aceite a través de las válvulas de apertura por presión

El paso permanente vienen a ser orificios fijos (salvo cuando el amortiguador es un monotubo regulable, en cuyo caso la regulación suele consistir en la variación del tamaño de orificio) que restringen el flujo de caudal.

En el caso de las válvulas de apertura por presión, para que éstas se abran es necesario ejercer sobre ellas una determinada presión y a medida que ésta aumenta la apertura va siendo mayor.

En la figura 2.30 se puede ver en detalle el pistón con los discos que componen las válvulas de apertura por presión y la aguja que regula el diámetro de la válvula de apertura por área cuando el amortiguador es variable.

Si se mueve la rosca de ajuste de la dureza del amortiguador para “ablandarlo”, la aguja abrirá el orificio facilitando el paso del aceite y disminuyendo la rigidez del amortiguador y viceversa.

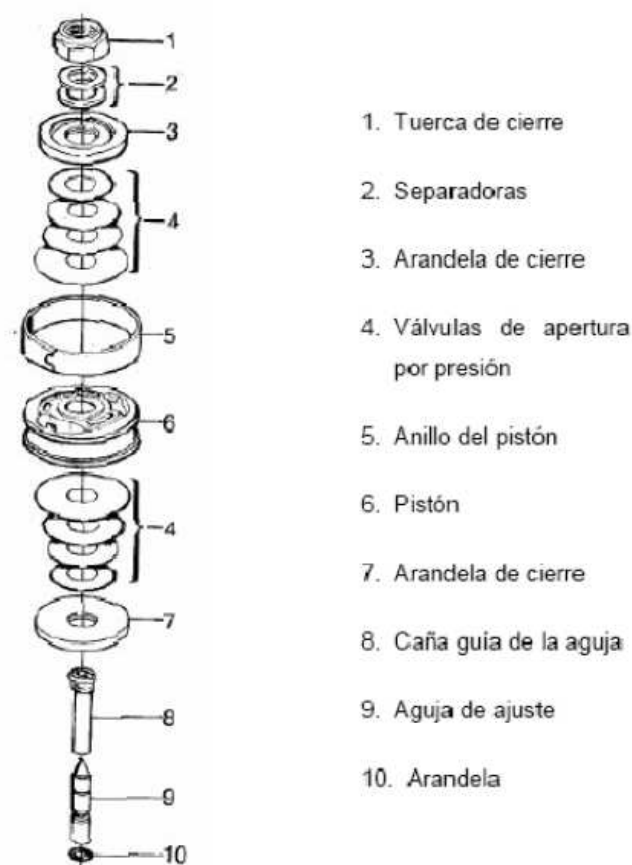


Figura 2. 30 Explosión del pistón de un amortiguador monotubo

Cuando la velocidad entre ambos extremos del amortiguador es baja, las válvulas de apertura por presión permanecen cerradas y el aceite pasa a través de los orificios de presión, estas empiezan a abrirse y dejan pasar el aceite.

Cuanto más aumenta la presión, las válvulas se abren más hasta que su apertura es completa y la ley de la fuerza en el amortiguador queda controlada nuevamente por el paso del aceite a través del orificio de paso permanente.

Lo normal es que las válvulas de extensión y compresión sean diferentes, lo que posibilita que el esfuerzo en compresión sea menor para una misma velocidad.

En los vehículos de carreras, interesa utilizar una característica de amortiguamiento más blanda en compresión (figura 2.31). Esto se hace para evitar la transmisión a través del amortiguador de las grandes fuerzas compresivas que se generan en el mismo cuando la rueda se encuentra con un obstáculo.

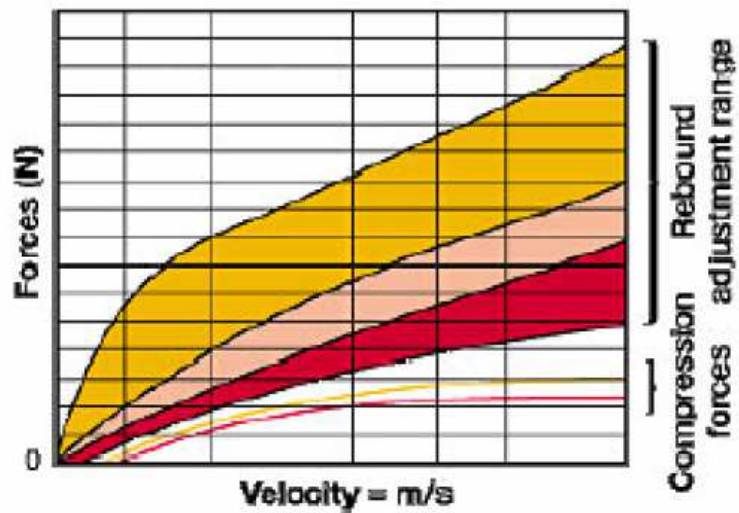


Figura 2. 31 Diagrama fuerza velocidad de un amortiguador regulable

Existen en el mercado fundamentalmente dos tipos de amortiguadores hidráulicos telescópicos: los de doble tubo o bitubo y los de un sólo tubo o monotubo (figura 2.32).

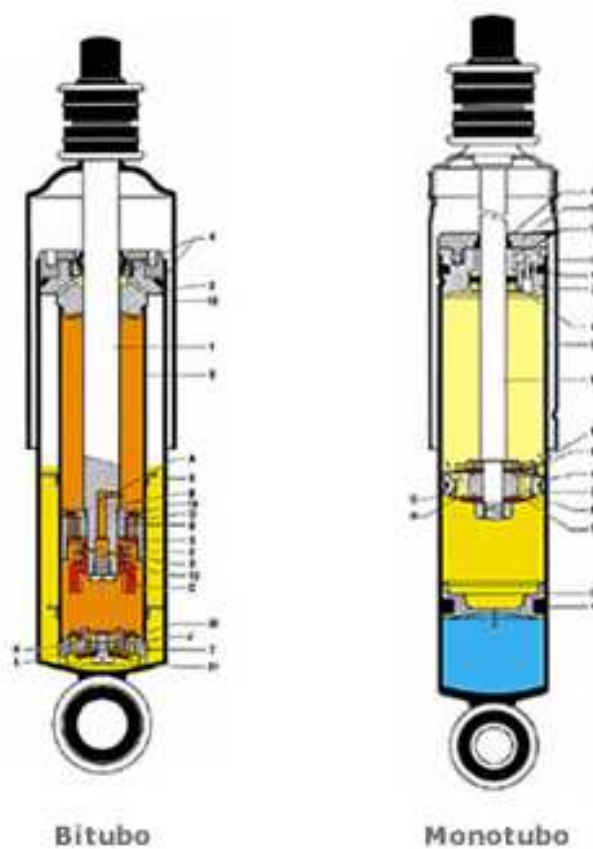


Figura 2. 32 Amortiguador de doble tubo y monotubo

A continuación se describen los amortiguadores de tipo telescópico de funcionamiento hidráulico.

2.3.10.1 Amortiguadores hidráulicos convencionales

Los amortiguadores hidráulicos convencionales son aquellos en los que la fuerza de amortiguación, para controlar los movimientos de las masas suspendidas y no suspendidas, se obtiene forzando el paso de un fluido a través de unos pasos calibrados de apertura diferenciada, con el fin de obtener la flexibilidad necesaria para el control del vehículo en diferentes estados.

Son los más usuales, de tarados pre-establecidos (se montan habitualmente como equipo de origen). Son baratos pero su duración es limitada y presentan pérdidas de eficacia con trabajo excesivo, debido al aumento de temperatura. No se suelen utilizar en conducción deportiva ni en competición [5].

Estos amortiguadores de tipo telescópico y de funcionamiento hidráulico están constituidos (figura 2.33) por un cilindro (A) dentro del cual puede deslizarse el émbolo (B) unido al vástago (C), que termina en el anillo soporte (D), unido al bastidor.

Rodeando el cilindro (A) va otro concéntrico, (F), y los dos terminan sellados en la parte superior por la empaquetadura (E), por la que pasa el vástago (C), al que también se une la campana (G), que preserva de polvo al amortiguador.

El cilindro (F) termina en el anillo (H), que se une al eje de la rueda y se comunica con el cilindro (A) por medio del orificio (I). El cilindro (A) queda dividido en dos cámaras por el pistón (B); éstas se comunican por los orificios calibrados (J y K), este último tapado por la válvula de bola (L).

Así constituido el amortiguador, quedan formadas las cámaras (1, 2 y 3), que están llenas de aceite. Cuando la rueda sube con relación al chasis, lo hace con ella el anillo (H) y, a la vez que él, los cilindros (A y F), con lo cual, el líquido contenido en la cámara inferior (2) va siendo comprimido, pasando a través de los orificios (J y K) a la cámara superior (1), en la que va quedando espacio vacío debido al movimiento ascendente de los cilindros (A y F).

Otra parte del líquido pasa de la cámara inferior (2) a la cámara de compensación (3), a través del orificio (I). Este paso forzado del líquido de una cámara a las otras, frena el movimiento ascendente de los cilindros (A y F), lo que supone una amortiguación de la suspensión.

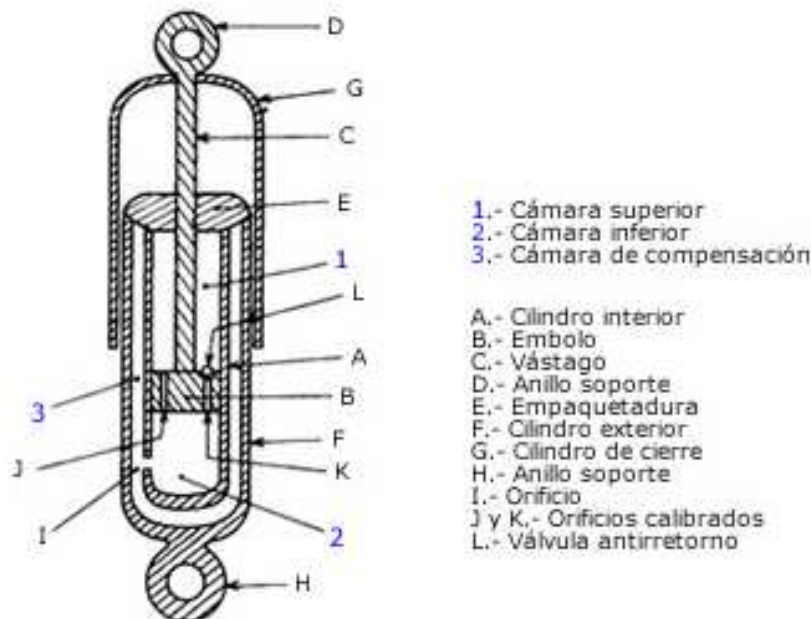


Figura 2. 33 Esquema interno de un amortiguador hidráulico

Cuando la rueda ha pasado el obstáculo que la hizo levantarse, se produce el disparo de la ballesta o el muelle, por lo que el anillo (H) baja con la rueda y con él los cilindros (A y F). Entonces el líquido de la cámara superior (1) va siendo comprimido por el pistón y pasa a la cámara inferior (2) a través del orificio (J) (por K no puede hacerlo por impedírselo la válvula antirretorno L), lo que constituye un freno de la expansión de la ballesta o el muelle.

El espacio que va quedando vacío en la cámara inferior (2) a medida que bajan los cilindros (A y F), se va llenando de aceite que llega de la cámara superior (1) y, si no es suficiente, del que llega de la cámara de compensación (3) a través del orificio (I).

Por tanto, en este amortiguador se ve que la acción de frenado es mayor en la expansión que en la compresión del muelle o ballesta, permitiéndose así que la rueda pueda subir con relativa facilidad y que actúe en ese momento el muelle o la ballesta; pero impidiendo seguidamente el rebote de ellos, que supondría un mayor número de oscilaciones hasta quedar la suspensión en posición de equilibrio.

Según el calibre del orificio (J), se obtiene mayor o menor acción de frenado en los dos sentidos; y según el calibre del orificio (K), se obtiene mayor o menor frenado cuando sube la rueda. En el momento que lo hace, el aceite contenido en la cámara inferior (2) no puede pasar en su totalidad a la superior (1), puesto que ésta es más reducida, debido a la presencia del vástago (C) del pistón; por ello se dispone la cámara de compensación (3), para que el líquido sobrante de la cámara inferior (2) pueda pasar a ella.

Todo lo contrario ocurre cuando la rueda baja: entonces el líquido que pasa de la cámara superior (1) a la inferior (2) no es suficiente para llenarla y por ello le entra líquido de la cámara de compensación (3).

Este tipo de amortiguador se ha visto que es de doble efecto; pero cuando la rueda sube, la acción de frenado del amortiguador es pequeña y cuando baja es grande, consiguiéndose con ello que al subir la rueda, sea la ballesta o el muelle los que deformándose absorban la desigualdad del terreno y, cuando se produzca la expansión, sea el amortiguador el que lo frene o disminuya las oscilaciones.

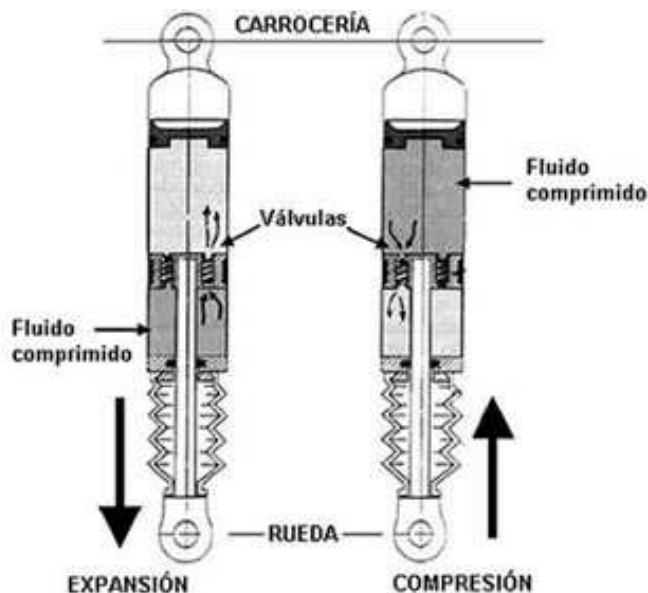


Figura 2. 34 Amortiguador hidráulico en compresión y expansión

La energía desarrollada por el muelle en la "compresión" y "expansión" (figura 2.34) es recogida por el amortiguador y empleado en comprimir el aceite en su interior. La energía, transformada en calor, es absorbida por el líquido.

Como el amarre de los resortes se realiza entre el elemento suspendido y el eje oscilante de las ruedas, los amortiguadores se montan también sujetos a los mismos elementos, con el fin de que puedan frenar así las reacciones producidas en ellos por los resortes. Esta unión se realiza con interposición de tacos de goma, para obtener un montaje elástico y silencioso de los mismos.

La temperatura ambiente y el calor absorbido por el aceite en el funcionamiento de los amortiguadores hidráulicos, influyen sobre la viscosidad del líquido, haciendo que el mismo pase con más o menos dificultad por las válvulas que separan las cámaras, resultando una suspensión más o menos amortiguada. Por esta razón, en invierno, en los primeros momentos de funcionamiento, se observa una suspensión más dura, ya que el aceite, debido al frío, se ha hecho más denso; en verano, o cuando el vehículo circula por un terreno irregular, el aceite se hace más fluido y se nota una suspensión más blanda.

Los amortiguadores que más se emplean actualmente en los automóviles son los amortiguadores hidráulicos telescópicos de doble efecto.

A continuación se describen los tipos de amortiguadores hidráulicos telescópicos.

2.3.10.1.1 Amortiguador bitubo

Los amortiguadores hidráulicos bitubo son los más comunes en la actualidad y pueden ser no presurizados (aceite) o presurizados (aceite y gas)

Constan de dos cámaras, una interior y otra de reserva. Hay válvulas en el pistón y en la base del amortiguador, llamada válvula de pie.

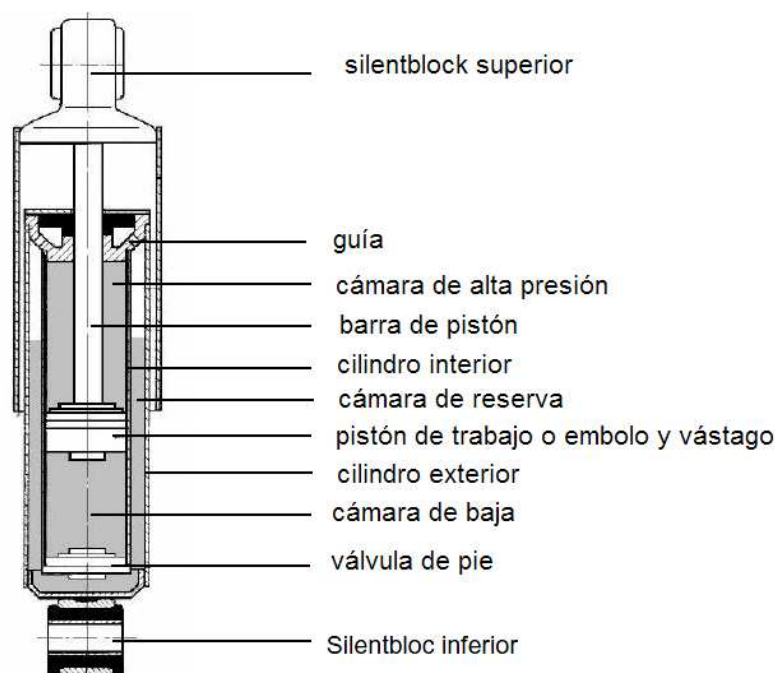


Figura 2. 35 Constitución de un amortiguador bitubo

Como se puede observar en la figura 2.35, un amortiguador bitubo está constituido por un cilindro interior concéntrico y solidario con un tubo o cilindro exterior, formando entre ambos la cámara de reserva de aceite. La parte inferior del cilindro está cerrada y se comunica con la cámara de reserva mediante la válvula de fondo.

En el interior del cilindro, totalmente lleno de aceite, se desplaza el pistón de trabajo o émbolo que está unido al vástago, este a su vez es portador, en este caso, del silentblock a través del cual se fija a la carrocería y al tubo protector.

El amortiguador se une al brazo de la suspensión mediante otro silentblock solidario al cilindro exterior. Por lo que el cilindro sigue las oscilaciones de la rueda y el émbolo, y además a través del vástago, las de la carrocería.

El funcionamiento del amortiguador es el siguiente: cuando disminuye la distancia entre la carrocería y la rueda, el émbolo se desplaza hacia abajo en relación al cilindro, comprimiendo el aceite en la cámara de baja presión, que es obligado a pasar a la cámara de alta presión a través de la válvula del émbolo.

Como la reducción del volumen en la cámara de baja presión es mayor que el aumento en la cámara de alta presión debido a que parte del aceite pasa por la válvula de fondo dirigiéndose hacia la cámara de reserva. Se puede decir que el mismo proceso sucede cuando la distancia entre la carrocería y la rueda se alarga, con la diferencia que en esta ocasión el aceite desalojado anteriormente hacia la cámara de reserva, vuelve a la cámara de baja presión a través de la válvula de fondo.

La amortiguación se produce al ser frenado el émbolo por el paso del aceite de una cámara a la otra a través de las válvulas.

Los amortiguadores no presurizados tienen la desventaja de que se pueden formar en ellos bolsas de aire bajo las siguientes condiciones:

- El amortiguador se almacena o transporta horizontalmente antes de ser instalado.
- La columna de aceite de la cámara principal cae por gravedad cuando el vehículo permanece estático durante mucho tiempo.
- El aceite se contrae como consecuencia de su enfriamiento al final de un viaje succionado aire hacia la cámara principal.

Los amortiguadores presurizados son uno de los más utilizados en los vehículos cuando se busca mejorar las prestaciones de los amortiguadores de doble tubo convencionales. La solución consiste en añadir una cámara de gas de baja presión, 4 bares es una presión suficiente, ya que la fuerza amortiguadora en compresión la sigue proporcionando la válvula de fondo.

De esta forma la fuerza de extensión realizada por el amortiguador en su posición nominal es baja.

Las ventajas de estos amortiguadores respecto a los no presurizados:

- Respuesta de la válvula más sensible para pequeñas amplitudes.
- Mejor confort de marcha.
- Mejores propiedades de amortiguación en condiciones extremas (grandes baches).
- Reducción de ruido hidráulico.
- Siguen operativos aunque pierdan el gas.

Respecto a los amortiguadores monotubo, los de doble tubo presurizados tienen la ventaja de tener una menor longitud y fricción para las mismas condiciones de operación.

2.3.10.1.2 Amortiguadores monotubo

Los amortiguadores hidráulicos monotubo aparecieron más tarde que los bitubo pero su uso es cada vez más extendido, principalmente en vehículos de altas prestaciones y en competición. Constan de dos cámaras principales. Una contiene el aceite y la otra el gas a presión, por lo general suele ser nitrógeno, que están separados por un pistón flotante. Solamente hay válvulas en el pistón.

En la figura 2.36 se muestra un esquema simplificado de un amortiguador monotubo.

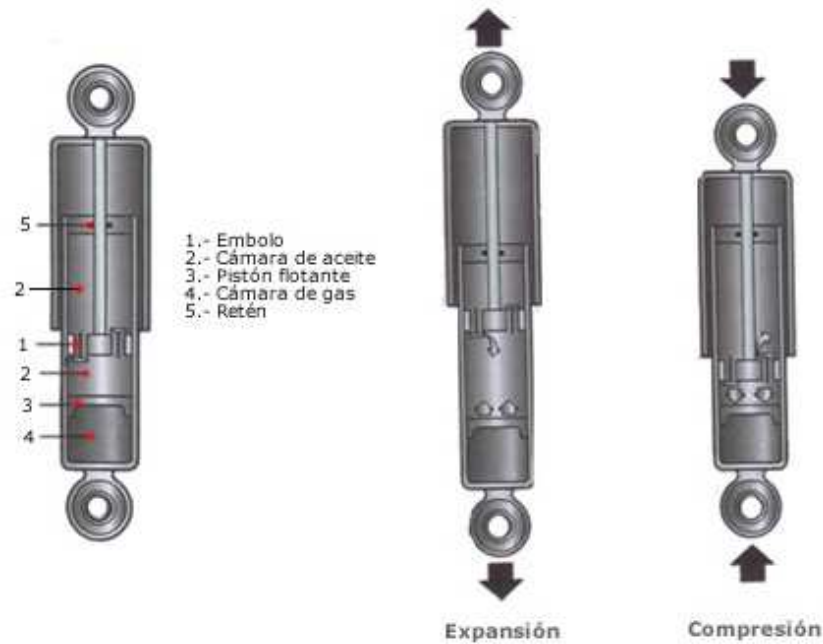


Figura 2. 36 Esquema simplificado de un amortiguador monotubo

Los amortiguadores monotubo tienen algunas ventajas respecto de los bitubo no presurizados:

- Buena refrigeración debido a que la cámara está en contacto directo con el aire.
- Mayor diámetro del pistón a igual diámetro de carcasa, lo que permite reducir las presiones de operación.
- El nivel de aceite no baja al quedar estacionado el vehículo.
- Debido a la presurización, el aceite no forma espuma, evitando problemas de cavitación.

Como desventajas se pueden citar las siguientes:

- Mayores costos derivados de requerimientos superiores de precisión, tolerancia y estanqueidad del gas.

- Las válvulas son más complejas.
- Su mayor necesidad de espacio puede aumentar su longitud por encima de los 100 mm en aplicaciones de automóviles.

2.4 Tipos de suspensiones mecánicas

Dependiendo de los elementos empleados y de la forma en que se monten, existen diferentes sistemas de suspensión, aunque todos ellos funcionan bajo el mismo principio. Constan de un sistema elástico, amortiguación y barra estabilizadora independientes para cada uno de los ejes del vehículo [4] y [9].

En la actualidad existen diferentes disposiciones de suspensión cuyo uso depende del fin que se le quiere dar al vehículo: mayores prestaciones, más comodidad, sencillez y economía.

Las suspensiones mecánicas se dividen en tres grupos:

- Rígidas.
- Semi-rígidas.
- Independientes.

2.4.1 Suspensiones rígidas

Las suspensiones rígidas están constituidas por un eje rígido en cuyos extremos se montan las ruedas. Debido a ello, todas las perturbaciones que afectan a una rueda se transmiten a la otra del mismo eje.

En la figura 2.37 se puede ver como al elevarse una rueda, se extiende su inclinación al eje y de este a la otra rueda. Como el eje va fijado directamente sobre el bastidor, la inclinación se transmite a todo el vehículo.

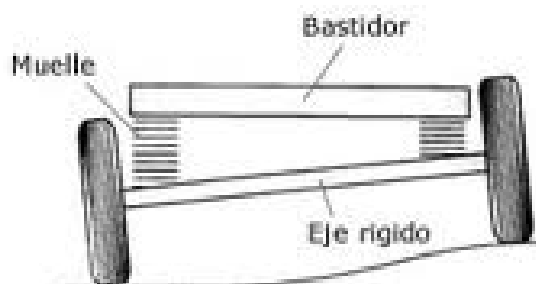


Figura 2. 37 Suspensión rígida

Esta disposición se caracteriza por su resistencia y lo económico que resulta a la hora de ser fabricada, pero presenta la desventaja de ser poco cómodo para los pasajeros y de proporcionar una menor seguridad. Este tipo de suspensión se emplea sobre todo en vehículos industriales, autobuses, camiones y vehículos todoterreno.

En la figura 2.38 se muestra un eje rígido actuando de eje propulsor. En vehículos de propulsión, el eje está constituido por una caja que contiene el mecanismo diferencial (1) y por los tubos (3) que contienen los palieres. El eje rígido en este caso se apoya contra el bastidor mediante ballestas (2) que hacen de elemento elástico transmitiendo las oscilaciones. Completan el conjunto los amortiguadores (4).

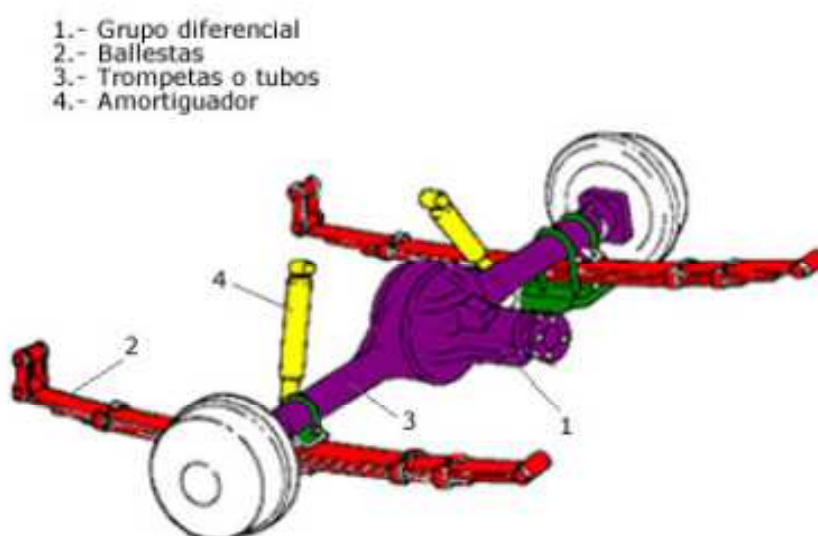


Figura 2. 38 Suspensión rígida para eje trasero propulsor

Para estabilizar el eje y generar un único centro de balanceo de la suspensión, se suele añadir una barra transversal uniendo el eje con el bastidor. A esta barra se le conoce con el nombre de barra “Panhard”, que se muestra en la figura 2.39. Tanto las barras longitudinales como la barra Panhard disponen de articulaciones elásticas que las unen con el eje y la carrocería.



Figura 2. 39 Barra Panhard, incorporada en un vehículo todoterreno

2.4.2 Suspensión semi-rígida

Las suspensiones semi-rígidas son similares a las rígidas. La diferencia está en que las ruedas se encuentran unidas entre sí, pero a diferencia del anterior, transmitiendo de forma parcial, de una rueda a la otra del mismo eje, las oscilaciones debidas a las irregularidades del terreno. La función motriz se separa de la función de suspensión y de guiado.

Una suspensión de este tipo es la suspensión con eje “De Dion” (figura 2.40).



Figura 2. 40 Esquema suspensión De Dion

Como se puede ver en la figura 2.41 las ruedas van unidas mediante soportes articulados (1) al grupo diferencial (2), en la suspensión con eje De Dion va anclado al bastidor del automóvil. El giro es transmitido a las ruedas a través de dos semiejes (palieres) como en las suspensiones independientes. A su vez ambas ruedas están unidas entre sí mediante una traviesa o tubo De Dion (3) que las ancla de forma rígida permitiendo a la suspensión deslizamientos longitudinales.

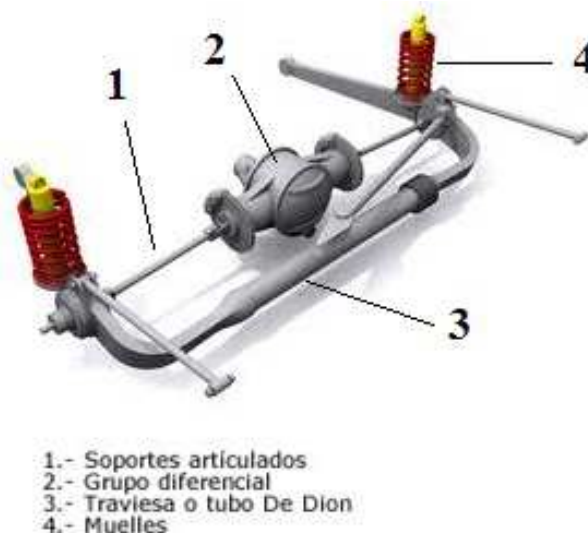


Figura 2. 41 Partes suspensión semirrígida

Este sistema tiene la ventaja, frente al eje rígido, que se disminuye la masa no suspendida debido al poco peso de la traviesa del eje De Dion y al anclaje del grupo diferencial al bastidor y mantiene los parámetros de la rueda prácticamente constantes. La suspensión posee además elementos elásticos de tipo muelle helicoidal (4) y suele ir acompañada de brazos longitudinales que limitan los desplazamientos longitudinales.

Esta suspensión es muy recomendable para vehículos de elevado peso, y además para aquellos que poseen tracción trasera. Por desgracia su elevado coste, complejidad y gran cantidad de elementos, cada uno de ellos potenciales puntos de fallo, casi la han erradicado de la industria automotriz moderna. Este tipo de suspensión fue utilizada por última vez en el Alfa Romeo 75 de 1991, con el mismo buen resultado que otros sistemas más avanzados. En la actualidad lo incorporan vehículos como el Honda HR-V (figura 2.42), el Smart City Coupé y Roadster o distintos modelos de Caterham.

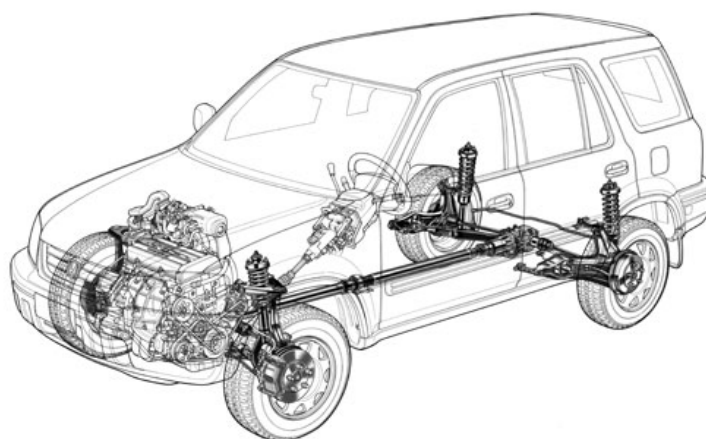


Figura 2. 42 Suspensión semirrígida Honda HR-V

2.4.3 Suspensión independiente

El sistema de suspensión independiente tiene un montaje elástico independiente en el que una rueda no está unida a la otra, como se muestra en la figura 2.43. En este sistema el movimiento de una rueda no se transmite a la otra y la carrocería resulta menos afectada.

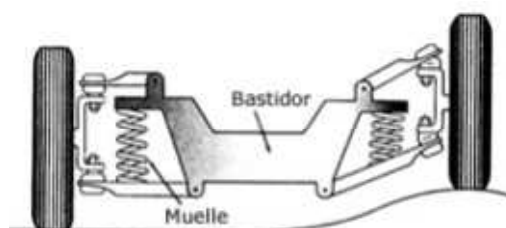


Figura 2. 43 Suspensión independiente

La suspensión independiente a las cuatro ruedas se impone cada vez más debido a que ofrece un gran confort y estabilidad al reducir de forma independiente las oscilaciones generadas por el pavimento sin transmitir las de una rueda a otra del mismo eje.

Una de las ventajas de la suspensión independiente es que posee menor peso no suspendido que otros tipos de suspensión por lo que las acciones transmitidas al chasis son de menor magnitud.

El diseño de este tipo de suspensión debe garantizar que las variaciones de caída de rueda y ancho de ruedas en las ruedas directrices tienen que ser pequeñas para conseguir una dirección segura del vehículo.

Este tipo de suspensión no es nada recomendado para vehículos de carga ya que puede dar problemas.

En la actualidad este tipo de suspensión es el único que se emplea en las ruedas directrices.

Existe un gran número de modelos de suspensión independiente en el mercado y además poseen múltiples variantes [4] y [10]. Los principales tipos de suspensión de tipo independiente son:

- Suspensión de eje oscilante.
- Suspensión de brazos tirados.
- Suspensión McPherson.
- Suspensión de paralelogramo deformable.
- Suspensión multibrazo (*multilink*).

2.4.3.1 Suspensión de eje oscilante

La peculiaridad del sistema de eje oscilante, que se muestra en la figura 2.44, es que el elemento de rodadura (1) y el semieje (2) son solidarios (salvo el giro de la rueda), de forma que el conjunto oscila alrededor de una articulación (3) próxima al plano medio longitudinal del vehículo. Este tipo de suspensión no se puede usar como eje directriz puesto que en el movimiento oscilatorio de los semiejes se altera notablemente la caída de las ruedas en las curvas. Completan el sistema de suspensión dos conjuntos muelle-amortiguador telescópico (4).

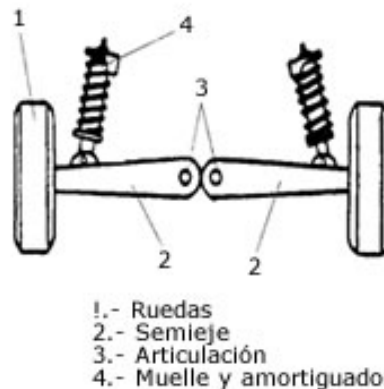


Figura 2. 44 Esquema de una suspensión de eje oscilante

Una variante de este sistema es el realizado mediante un eje oscilante pero de una sola articulación, mostrado en la figura 2.45.

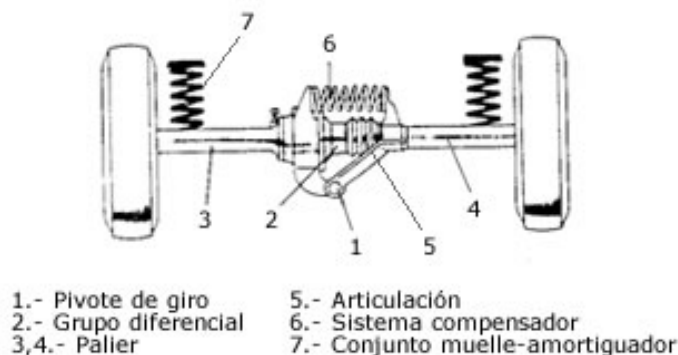


Figura 2. 45 Esquema de eje oscilante y compensado

La ventaja que presenta es que el pivote de giro (1) está a menor altura que en el eje oscilante de las dos articulaciones. El mecanismo diferencial (2) oscila con uno de los palieres (3) mientras que el otro (4) se mueve a través de una articulación (6) que permite a su vez un desplazamiento de tipo axial en el árbol de transmisión. El sistema también cuenta con dos conjuntos muelle-amortiguador (7).

2.4.3.2 Suspensión de brazos tirados o arrastrados

La suspensión de brazos tirados se caracteriza por tener dos brazos en disposición longitudinal que van unidos por un extremo al bastidor y por el otro a la mangueta de la rueda. Si el eje es de tracción, el grupo diferencial va anclado al bastidor. En cualquier caso las ruedas son tiradas o arrastradas por los brazos longitudinales que pivotan en el anclaje de la carrocería.

Este sistema de suspensión ha dado pie a un gran número de variantes cuyas diferencias se encuentran en cuál es el eje de giro del brazo tirado en el anclaje al bastidor y cuál es el elemento elástico que utiliza.

En la figura 2.46 se muestra cómo los brazos tirados pueden pivotar de formas distintas. Los brazos longitudinales pueden pivotar sobre un eje de giro perpendicular al plano longitudinal del vehículo. Este tipo de suspensión apenas produce variaciones de vía, caída o avance de la rueda.

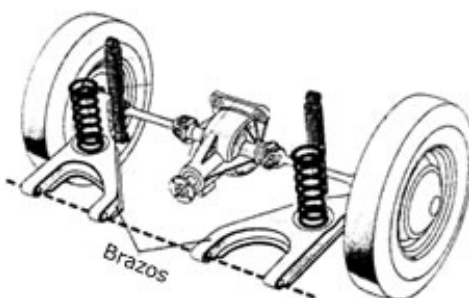


Figura 2. 46 Sistema de brazo arrastrado

Los brazos también pueden pivotar sobre ejes que tienen componentes longitudinales, es decir, sobre ejes oblicuos al plano longitudinal del vehículo. A esta variante se la conoce como “brazos semi-arrastrados” (figura 2.47) y tiene la ventaja de que no precisa estabilizadores longitudinales debido a la componente longitudinal que tiene el propio brazo o soporte.

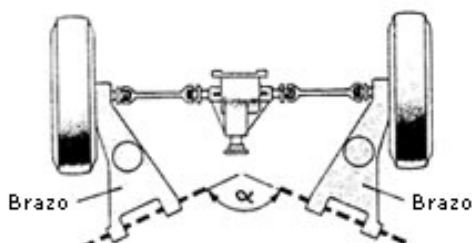


Figura 2. 47 Sistema de brazo semi-arrastrado

Las variaciones de caída y de vía dependen de la posición e inclinación de los brazos longitudinales, por lo tanto, permite que se varíe durante la marcha la caída y el avance de las ruedas con lo que se mejora la estabilidad del vehículo. En cuanto al tipo de elementos elásticos que se utilizan en estas suspensiones, se encuentran las barras de torsión y los muelles.

En los sistemas de suspensión de brazos tirados con barras de torsión, las barras se montan de manera transversal a la carrocería. Como mínimo han de utilizarse dos, pudiéndose montar cuatro en vehículos cuyo tarado deba ser mayor. Existen modelos que montan dos barras de torsión en el puente trasero (figura 2.48), mientras que un modelo similar pero con mayor motorización, monta cuatro barras unidas por una gemela (figura 2.49).

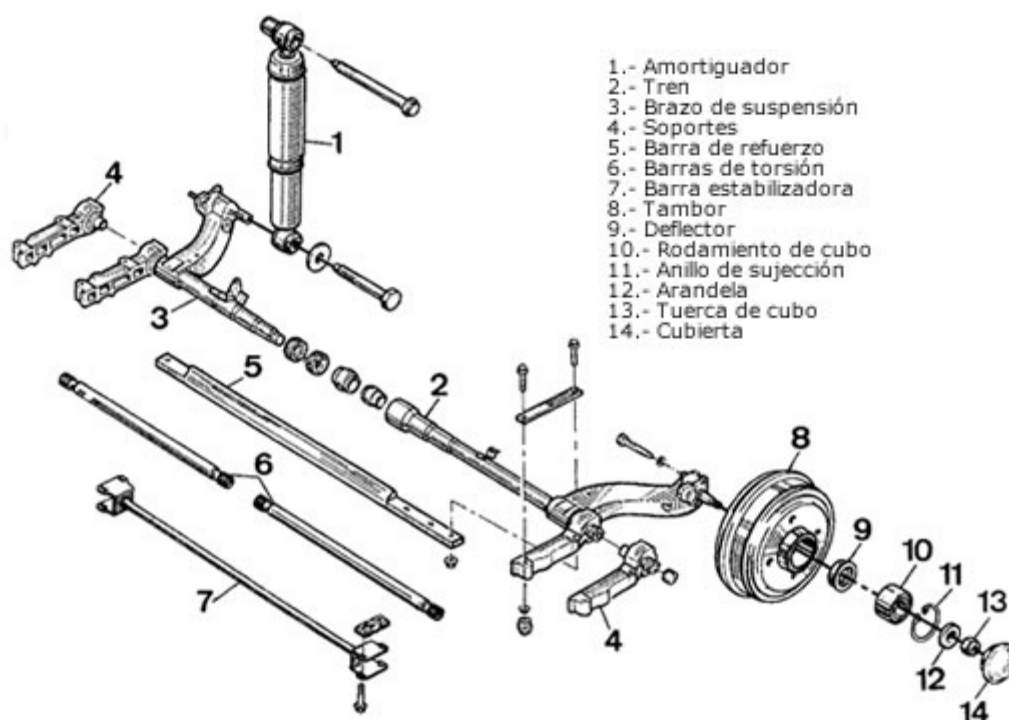


Figura 2. 48 Suspensión de brazos tirados con dos barras de torsión

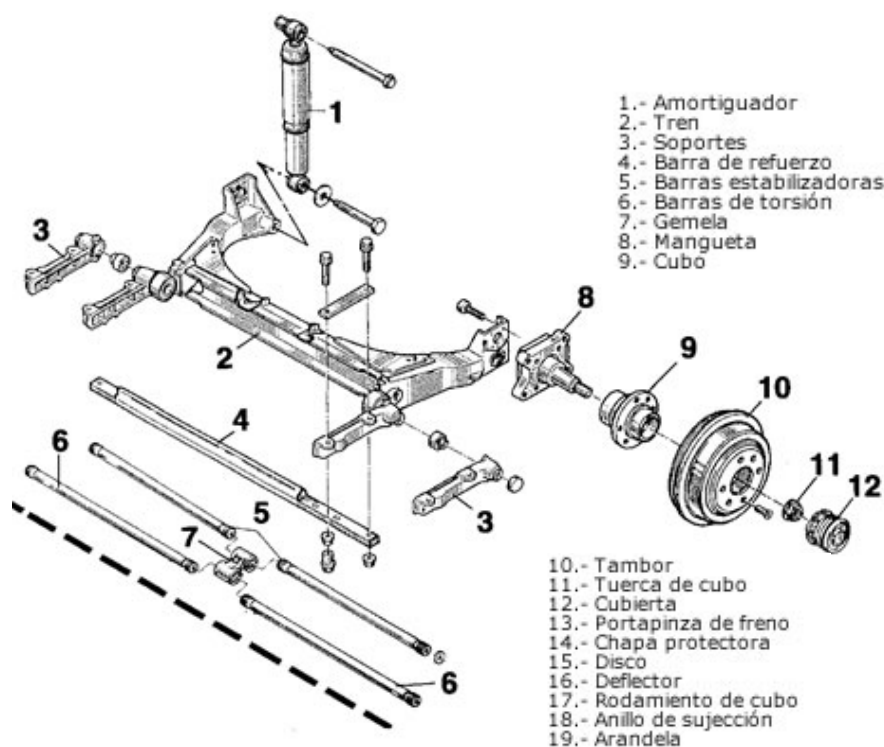


Figura 2. 49 Suspensión de brazo tirado con cuatro barras de torsión

2.4.3.3 Suspensión McPherson

La suspensión McPherson es uno de los sistemas más utilizados en el tren delantero aunque se puede montar también en el trasero. Dicho sistema ha tenido mucho éxito, fundamentalmente en vehículos modestos, por su sencillez de fabricación y mantenimiento, el bajo coste de producción y el poco espacio que ocupa.

En la figura 2.50 se muestra un esquema de la suspensión McPherson.

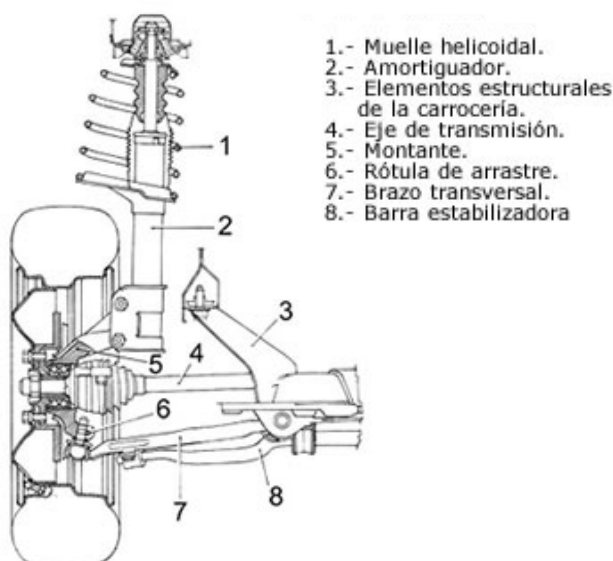


Figura 2. 50 Esquema de un sistema de suspensión McPherson

La figura 2.51 muestra un modelo detallado de una suspensión McPherson con brazo inferior y barra estabilizadora.

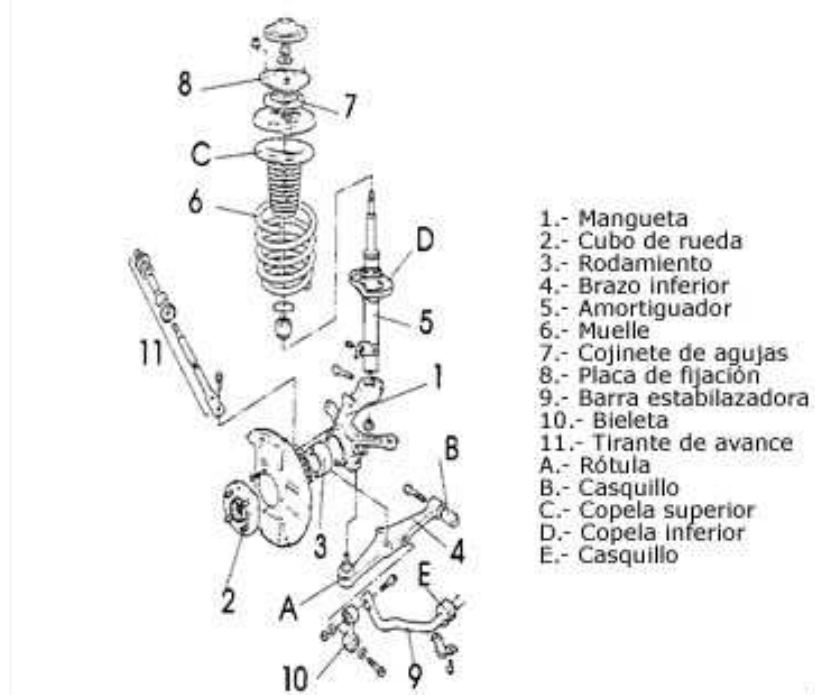


Figura 2. 51 Despiece suspensión McPherson

La mangueta (1) de la rueda va unida al cubo (2) permitiendo el giro de este mediante un rodamiento (3). A su vez la mangueta va unida al bastidor mediante un casquillo (B) y a través del brazo inferior (4) que a su vez va unido a la mangueta (1) mediante una unión elástica (A) (rótula).

El conjunto muelle helicoidal-amortiguador está formado por el amortiguador (5) que va anclado de forma fija a la parte superior de la mangueta (1) y el muelle (6) que es concéntrico al amortiguador y está sujeto mediante dos copelas, superior (C) e inferior (D). El amortiguador está unido al bastidor por su parte superior mediante un cojinete de agujas (7) y una placa de fijación (8). En las ruedas delanteras es necesaria la existencia de este cojinete axial ya que el amortiguador al ser solidario a la mangueta gira con esta al actuar la dirección.

Su mecanismo forma un triángulo articulado formado por el brazo inferior (4), bastidor y muelle-amortiguador. El lado del triángulo que corresponde al muelle-amortiguador es de compresión libre por lo que sólo tiene un único grado de libertad: la tracción o compresión de los elementos elásticos y amortiguador.

Al transmitirse a través del muelle-amortiguador todos los esfuerzos al chasis, es necesario un dimensionado más rígido de la carrocería en la zona de apoyo de la placa de fijación (8).

Como elementos complementarios a esta suspensión se encuentra la barra estabilizadora (9) unida al brazo inferior mediante una bieleta (10) y al bastidor mediante un casquillo (E), y en este caso un tirante de avance (11).

2.4.3.4 “Falsa” McPherson

En la actualidad existen múltiples variantes en cuanto a la sustitución del tirante inferior que puede ser realizada por un triángulo inferior, doble bieleta transversal con tirante longitudinal, etc.

Al sistema de doble bieleta transversal con tirante longitudinal se les ha denominado “falsa” McPherson, al igual que el “verdadero” utilizan el amortiguador como elemento de guía y mantienen la estructura de triángulo articulado.

La suspensión clásica McPherson dispone de la barra estabilizadora como tirante longitudinal, mientras que las denominadas “falsa” McPherson ya absorben los esfuerzos longitudinales con la propia disposición del anclaje del elemento que sustituye al brazo inferior.

En la figura 2.52 se muestra un esquema McPherson donde se ha sustituido el brazo inferior por un triángulo (1) que va unido a la mangueta (2) mediante una rótula (A) y a la cuna del motor (3) mediante dos casquillos (C) y (D).

El resto de los componentes son similares al de una McPherson convencional.

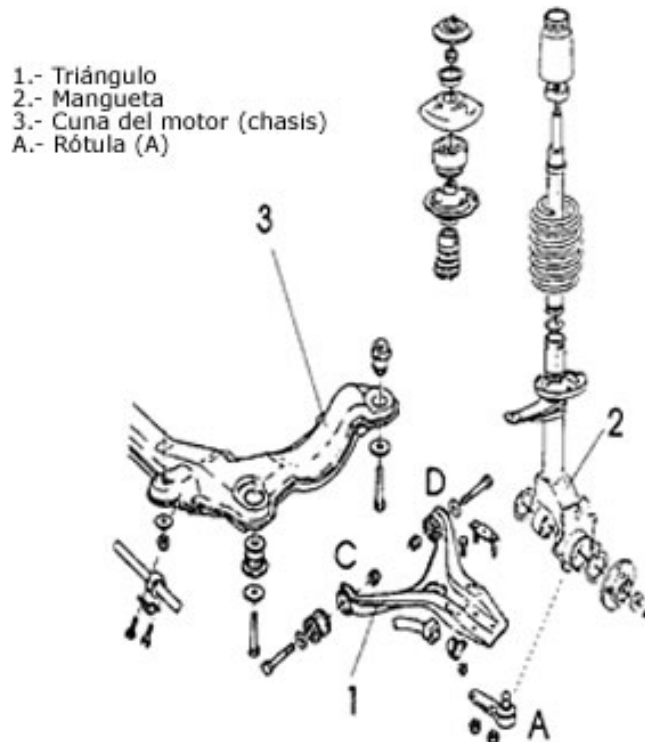


Figura 2. 52 Falsa McPherson

2.4.3.5 Suspensión de paralelogramo deformable

La suspensión de paralelogramo deformable junto con la McPherson es de las que más se usan en automóviles tanto para el tren delantero como para el trasero. También se la denomina suspensión por trapecio articulado y suspensión de triángulos superpuestos.

En la figura 2.53 se muestra una suspensión de paralelogramo deformable.

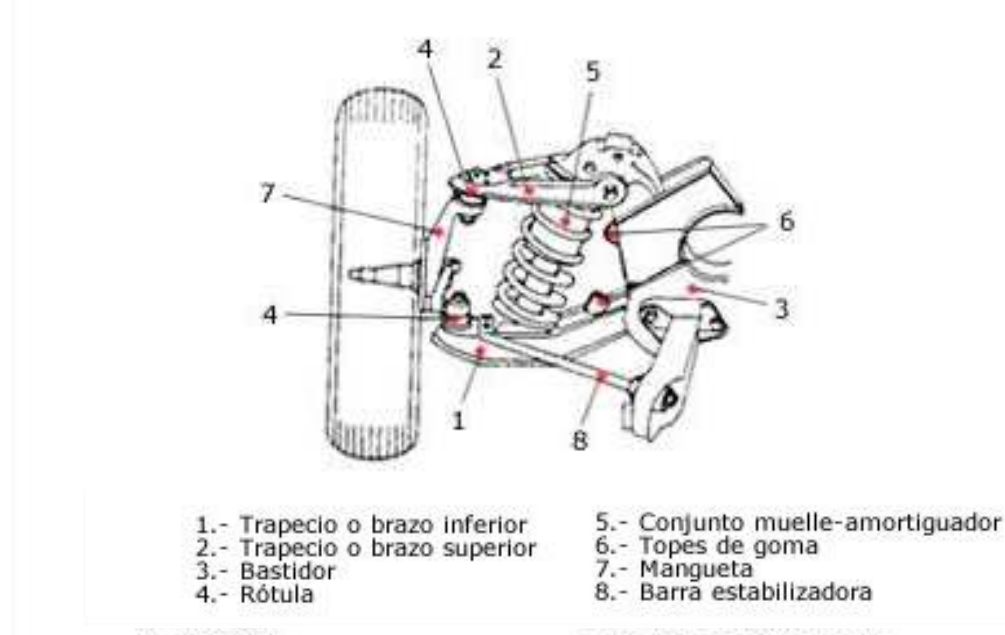


Figura 2. 53 Suspensión de paralelogramo deformable

El paralelogramo está formado por un brazo superior (2) y otro inferior (1) que se encuentran unidos al chasis a través de unos pivotes, cerrando el paralelogramo a un lado el propio chasis y al otro la propia mangueta (7) de la rueda. La mangueta está articulada con los brazos mediante rótulas esféricas (4) que permiten la orientación de la rueda.

Los elementos elásticos y los amortiguadores coaxiales (5) son de tipo resorte helicoidal e hidráulico telescópico respectivamente y están unidos por su parte inferior al brazo inferior y por su parte superior al bastidor.

Completan el sistema unos topos (6) que evitan que el brazo inferior suba lo suficiente como para sobrepasar el límite elástico del muelle y un estabilizador lateral (8) que va anclado al brazo inferior (1).

Variando las longitudes de los brazos (1) y (2) se pueden conseguir distintas geometrías de suspensión de forma que puede variar la estabilidad y la dirección según sea el diseño de estos tipos de suspensión.

La evolución de estos sistemas de suspensión de paralelogramo deformable ha dado lugar a las actuales suspensiones Multibrazo o *Multilink*

2.4.3.6 Suspensiones Multibrazo o *Multilink*

Las suspensiones multibrazo se basan en el mismo concepto básico que sus precursoras, las suspensiones de paralelogramo deformable.

El paralelogramo está formado por dos brazos transversales, la mangueta de la rueda y el propio bastidor. La diferencia fundamental de estas suspensiones se encuentra en los elementos guía de la suspensión multibrazo, los cuales pueden tener anclajes elásticos mediante manguitos de goma. Gracias a ellos las multibrazo permiten modificar tanto los parámetros fundamentales de la rueda, como la caída o la convergencia, de la forma más apropiada para mejorar la estabilidad del vehículo en las distintas situaciones de uso.

Lo que quiere decir que las dinámicas longitudinal y transversal pueden configurarse de forma precisa y prácticamente independiente entre sí, y que puede alcanzarse un grado máximo de estabilidad direccional y confort.

A principios de los años noventa se comenzaron a instalar estos sistemas multibrazo en automóviles de serie pero a pesar de los buenos resultados había cierto rechazo en colocarlos para los ejes no motores.

Actualmente, las grandes berlinas adoptan este sistema en uno de los trenes o en ambos. Para que una suspensión se considere multibrazo debe estar formada al menos por tres brazos.

Las suspensiones multibrazo se pueden clasificar en dos grupos fundamentales:

- Suspensiones multibrazo con elementos de guía transversales u oblicuos con funcionamiento similar al de las suspensiones de paralelogramo deformable.
- Suspensiones multibrazo que además disponen de brazos de guía longitudinal con un funcionamiento que recuerda a los sistemas de suspensión de ruedas tiradas por brazos longitudinales.

La suspensión delantera (figura 2.54) consta de un brazo superior (1) que va unido a una mangueta (2) larga y curvada mediante un buje de articulación (A) y un brazo inferior transversal (3) que va unido a la mangueta por una rótula doble (B) y al bastidor por un casquillo (C) que aísla de las vibraciones. Cierra el paralelogramo deformable el propio bastidor como en cualquier suspensión de este tipo.

Esta suspensión dispone además de un tercer brazo (4) que hace de tirante longitudinal y que está unido al bastidor y mangueta de la misma forma que el brazo inferior transversal (3). La gran altura de la prolongación de la mangueta consigue una disminución de los cambios de convergencia de la rueda y un ángulo de avance negativo.

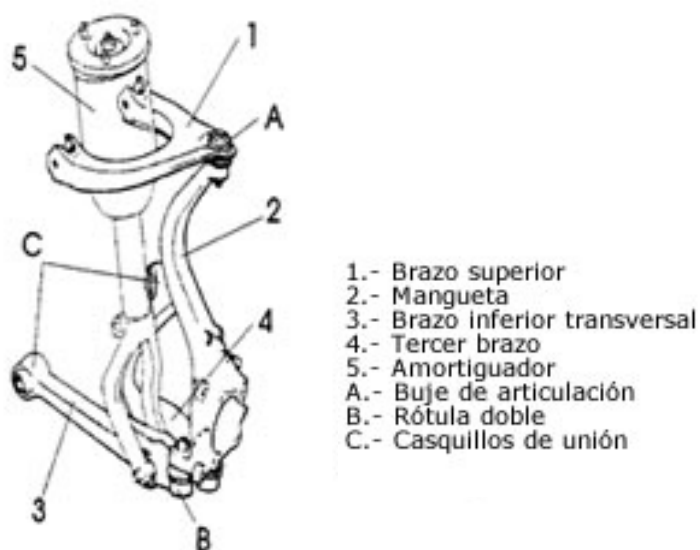


Figura 2. 54 Suspensión multibrazo delantera

La suspensión trasera (figura 2.55) consta de un brazo superior (1) con forma de triángulo como la delantera, pero dispone de dos brazos transversales, superior (2) e inferior (3) y un tirante longitudinal inferior (4). Las articulaciones son similares al modelo de suspensión delantera.

Ambos sistemas poseen como elementos elásticos muelles helicoidales y amortiguadores telescópicos (5) y también barra estabilizadora. En la figura 2.55 se puede ver que el amortiguador va anclado a la barra inferior transversal (3) mediante una horquilla.

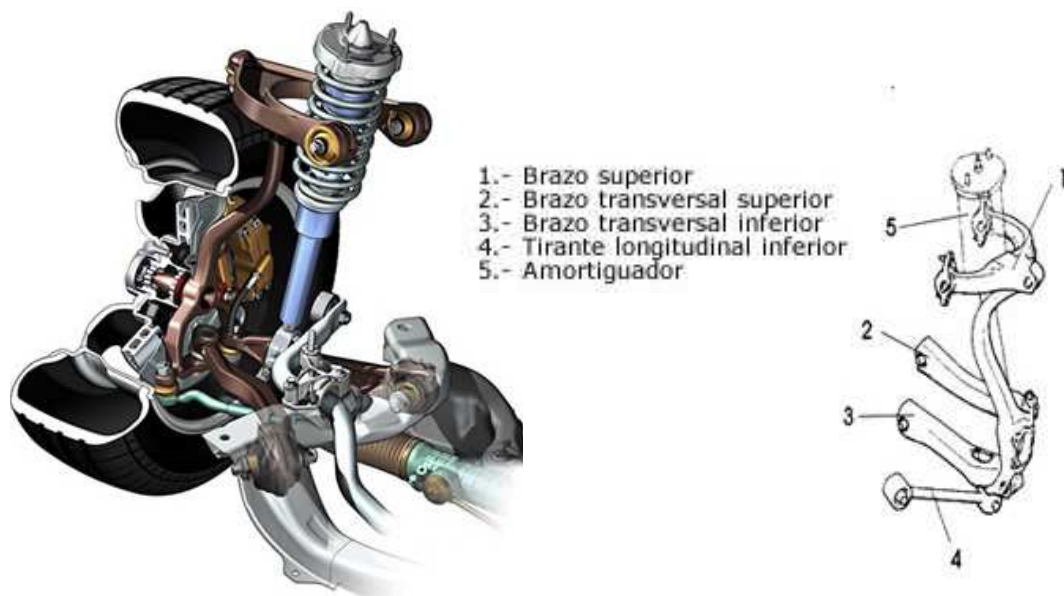


Figura 2. 55 Suspensión multibrazo trasera

2.5 Suspensiones regulables

La suspensión convencional o pasiva, como las estudiadas en el apartado anterior, genera ciertas dificultades a la hora de elegir el tarado ya que existe una pequeña incompatibilidad entre el confort y la estabilidad del vehículo [1].

En la figura 2.56 se puede ver el esquema de la suspensión pasiva. Una suspensión dura dará una mayor estabilidad al vehículo pero a cambio el confort disminuye. Sin embargo, una suspensión blanda aumentará el confort pero disminuirá la estabilidad. Por este motivo, hay vehículos que debido a su uso disponen de tarados blandos que absorben al máximo las oscilaciones de la carrocería debidas a las irregularidades del terreno y en cambio hay otros que por su conducción más deportiva optan por tarados duros para dar al vehículo una mayor estabilidad principalmente en el trazado de curvas a altas velocidades.

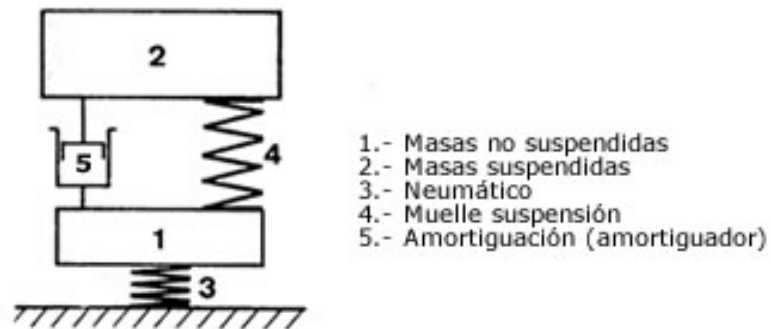


Figura 2. 56 Esquema de suspensión pasiva para una rueda

Lo ideal de una suspensión sería que se pudiera adaptar automáticamente a las condiciones del terreno o al gusto del conductor. Debido a ello actualmente están apareciendo infinidad de posibilidades de regulación. Así, la evolución de los sistemas de suspensión parece que va en la línea de los llamados sistemas “inteligentes”. Dentro de estos sistemas se pueden encontrar suspensiones activas o semiactivas.

2.5.1 Suspensiones activas

La suspensión activa se crea para solucionar el conflicto entre la fuerza que ejerce la rueda contra el suelo y el confort del vehículo. Con este tipo de suspensión se consigue una solución tecnológicamente muy avanzada que permite solucionar este conflicto, consiguiendo además grandes niveles de control, maniobrabilidad y confort en un amplio rango de frecuencias [11] y [12].

El mayor inconveniente de este tipo de suspensión es su elevado coste, fundamentalmente para el control sobre altas frecuencias, cuya implementación resulta demasiado cara.

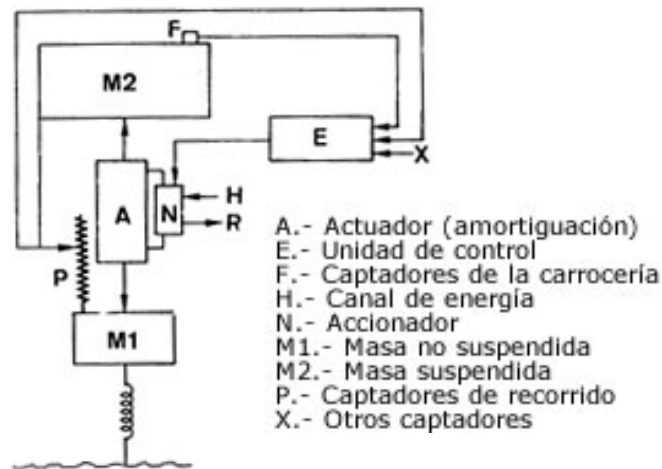


Figura 2. 57 Esquema de las suspensiones activas

Como se muestra en el esquema de la figura 2.57, la suspensión activa se compone de un actuador hidráulico, o neumático, que genera fuerzas para compensar el balanceo y cabeceo del vehículo, mientras que un ordenador electrónico se encarga de monitorizar constantemente el perfil de la carretera por medio de sensores y envía señales eléctricas a las suspensiones delantera y trasera. Aquí será donde los componentes hidráulicos, consistentes en bombas, actuadores y servoválvulas, actuarán manteniendo un nivel máximo de estabilidad.

El tiempo de respuesta indica el ancho de banda. Si este abarca un rango de frecuencias de 3 ó 5 Hz el sistema de suspensión se denomina de baja frecuencia (*Low Bandwith Systems*), mientras que si el rango abarca hasta 10 o 12 Hz, se denomina de alta frecuencia (*High Bandwith Systems*). La suspensión activa puede controlar ambos rangos. Pero debido al coste que suponen y a la potencia que estos necesitan para funcionar, la cual toman del motor, se reduce su utilización a la competición, como Fórmula 1 donde se prohibió en 1994.

En coches de calle de alta gama se empleó la suspensión CATS (*Computer Active Technology Suspension*) instalada en los modelos más deportivos de Jaguar como el XKR (figura 2.58) y el SType R, que utiliza tecnología de regulación electrónica adaptable para cambiar de tarado en función de la carretera y de las condiciones dinámicas de conducción.



Figura 2. 58 Jaguar XKR con sistema CATS

2.5.2 Suspensiones semiactivas

La suspensión semiactiva fue presentada en la década de los 70 como alternativa a las suspensiones activas debido a su elevado coste. Estas suspensiones incorporan elementos pasivos y activos para lograr optimizar el comportamiento del vehículo ante las irregularidades del terreno. En la figura 2.59 se muestra un esquema de suspensión semiactiva.

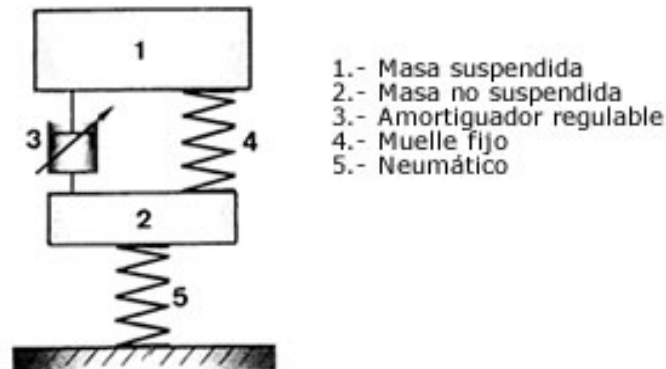


Figura 2. 59 Esquema de las suspensiones semiactivas

Las suspensiones semiactivas se basan en la modificación la rigidez del muelle o del amortiguador mediante actuadores de baja potencia, normalmente de manera discreta en función de diferentes parámetros previamente monitorizados por sensores. Las bajas frecuencias son controladas con elementos activos y las altas con pasivos. [11] y [12].

Algunos sistemas de suspensión semiactiva incorporan amortiguadores hidráulicos, los cuales disponen de válvulas solenoides que cambian el diámetro de sus pasos permanentes, variando de esta manera el caudal del fluido. El inconveniente que presentan estos tipos de amortiguadores es que tienen un tiempo de respuesta (100-200 ms) superior al tiempo de muestreo del controlador haciendo que la fuerza de control generada sea diferente a la fuerza de control deseada. Para solucionar este problema, muchos investigadores están centrando su atención en sistemas de suspensión semiactiva basados en fluidos inteligentes, como son los fluidos electro-reológicos y los magneto-reológicos, cuyos tiempos de respuesta son inferiores a 25 ms.

Los fluidos magneto-reológicos generan mayores niveles de fuerza que los electro-reológicos y pueden trabajar en un rango mayor de temperaturas. Es por ello que en la actualidad amortiguadores magneto-reológicos están tomando mucha fuerza, siendo utilizados para mejorar el comportamiento de la suspensión en vehículos automóviles y obteniendo muy buenos resultados.

Este fluido está compuesto de partículas metálicas flotando en él. Al magnetizarse, según si lo hace mucho o poco, modifica su viscosidad, consiguiendo variar la dureza del amortiguador. A medida que aumenta el campo magnético, el fluido se vuelve

fibroso y su estructura llega a ser casi plástica. Las reacciones del fluido al pasar por los orificios del amortiguador cambian con la diferencia de viscosidad.

Cuando no está magnetizado, hay una gran diferencia de velocidad entre las partículas que están próximas a las paredes del orificio, y las que fluyen rodeadas de otras partículas del fluido. Gracias a esa diferencia de velocidad, el caudal puede ser grande y, por tanto, el amortiguador es suave.

Cuando el fluido está magnetizado, la velocidad de todas las partículas es muy semejante. El flujo es más lento y, por tanto, la dureza del amortiguador aumenta.

El amortiguador se endurece cuando es preciso limitar más los rebotes del muelle para aumentar el contacto con el suelo, bien por razones de estabilidad o por frenada. También actúa para frenar movimientos como balanceo o cabeceo, aunque la amplitud de esos movimientos depende de los muelles y las barras estabilizadoras, no de los amortiguadores [11].

La desventaja con respecto a los amortiguadores tradicionales, es que generalmente las propiedades del fluido son constantes y en consecuencia el coeficiente de amortiguación y el valor de la fuerza generada.

La principal ventaja de este sistema frente a los tradicionales es la rapidez de variación del tipo de amortiguación, y las infinitas posibilidades de regulación que permite.

En los últimos años se han estado desarrollando los amortiguadores magneto-reológicos, cuyas aplicaciones no están limitadas al área automotriz sino también a las construcciones civiles y a la robótica.

Los prototipos datan de principios de los 90, aunque General Motors presentó este sistema en el Salón de Fráncfort de 1999, y emplea la segunda generación en modelos como el Cadillac Seville y el Chevrolet Corvette.

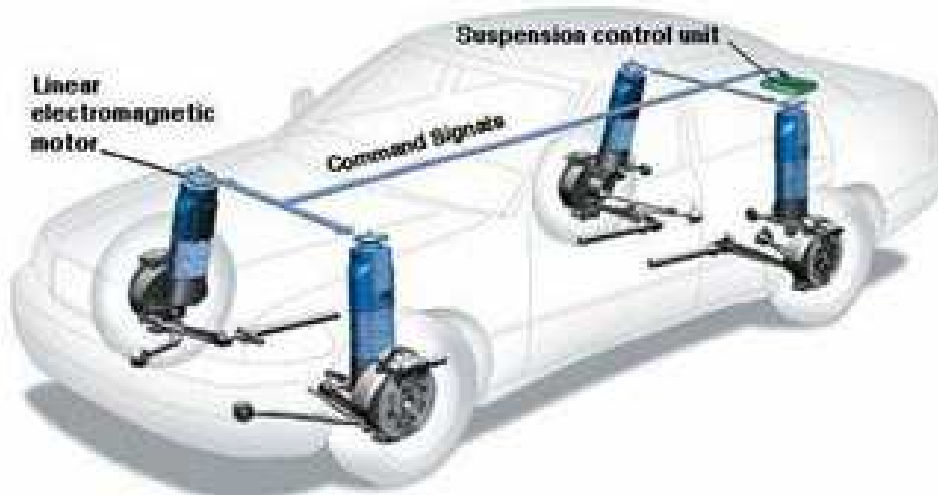




Figura 2. 60 Cadillac Seville STS equipado con el sistema MagneRide de Delphi

En la figura 2.60 se muestra un Cadillac Seville STS equipado con el sistema *MagneRide de Delphi Automotive*. Dicho sistema es la primera aplicación industrial de un fluido con viscosidad variable debido a la presencia de un campo magnético.

El fluido que utiliza el sistema MagneRide es una suspensión no coloidal, con partículas de hierro con un tamaño de algunas micras en un hidrocarburo sintético. En ausencia de un campo magnético, las partículas de hierro se encuentran dispersas al azar en el seno del fluido. A medida que aumenta el campo magnético, se vuelve fibroso y su estructura llega a ser casi plástica.

Las reacciones del fluido al pasar por los orificios del amortiguador cambian con la diferencia de viscosidad. Cuando no está magnetizado, la diferencia de velocidad entre las partículas es muy grande (figura 2.61). Gracias a ello, el caudal puede ser grande y, por tanto, el amortiguador es suave. Cuando el fluido está magnetizado, la diferencia de velocidad de las partículas es muy pequeña, el fluido es más lento, provocando que la dureza del amortiguador aumente.

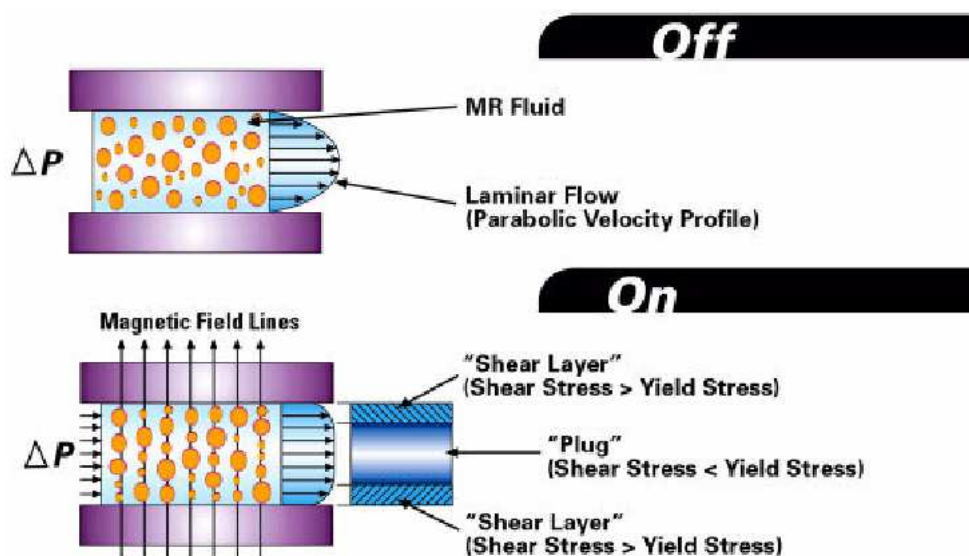


Figura 2. 61 Magnetización del fluido del MagneRide

La intensidad del campo magnético es ajustada por una centralita, que recibe señales de cinco sensores (figura 2.62). Tres de ellos están en el control de estabilidad (ángulo de dirección, guiñada y aceleración transversal), otro en la velocidad del coche y otro en la posición relativa de las ruedas. Delphi ha previsto que esta misma centralita pueda controlar un sistema de altura constante.

Este sistema de suspensión variable sigue el mismo principio que una suspensión activa o semiactiva: suave cuando es posible y dura cuando es necesario.

El amortiguador se endurece cuando es preciso limitar más los rebotes del muelle para aumentar el contacto con el suelo, ya sea por razones de estabilidad o de frenada.

También actúa para frenar movimientos como el balanceo o el cabeceo, a pesar de que la amplitud de estos movimientos depende de los muelles y las barras estabilizadoras y no de los amortiguadores [11].

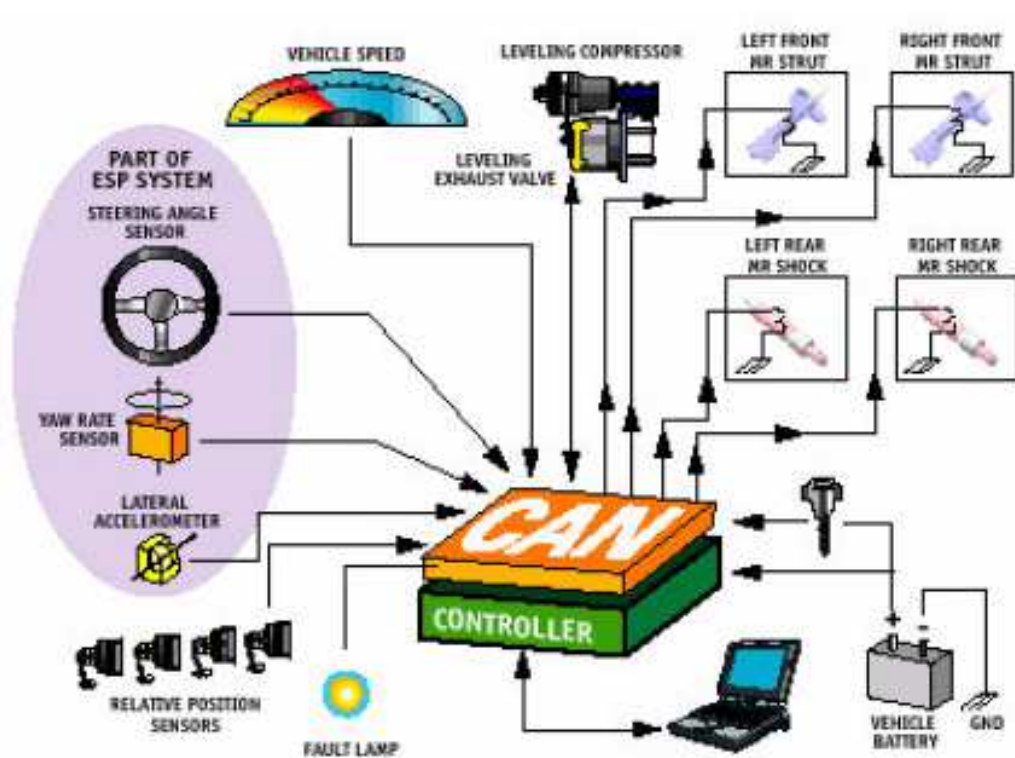


Figura 2. 62 Sistema de control Delphi

En España hasta hace muy poco no se había hablado de amortiguadores magneto-reológicos y los conocimientos que se tienen de lo que es un fluido MR son muy escasos.

CAPÍTULO 3: FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS

3.1 Introducción

El descubrimiento y desarrollo de los fluidos magneto-reológicos (MR) puede acreditarse a Jacob Rabinow. Estos fluidos se componen de partículas magnetizables muy pequeñas suspendidas en un líquido portador adecuado.

Normalmente los fluidos MR son líquidos de consistencia similar a los aceites de motor, pero, cuando se aplica un campo magnético exterior se produce un momento dipolar en las partículas de hierro, formando una cadena paralela al campo como se muestra en la figura 3.1.

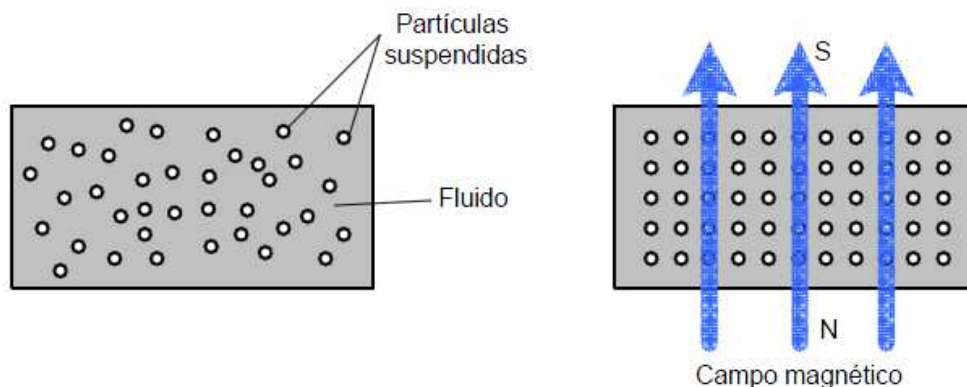


Figura 3. 1 Formación de cadenas paralelas al campo magnético

La alineación de las partículas de hierro suspendidas en el líquido provoca que se pueda restringir el movimiento del fluido, en consecuencia, se desarrolla una fuerza en el fluido que depende de la magnitud del campo magnético aplicado, lo importante es que esto ocurra en un rango de tiempo de milisegundos [13].

Un fluido MR contiene del 20 al 40% de partícula de hierro del volumen total neto, dichas partículas son suspendidas generalmente en aceite mineral, aceite sintético, etc. Los aceites hidrocarburos son preferidos porque son muy buenos lubricantes, durables, estables y los aditivos evitan la sedimentación de las partícula de hierro, en el mercado existen un gran variedad de fluidos con diferentes viscosidades.

Otro factor que interviene en el desarrollo de la fuerza en el fluido es la curva de saturación magnética de las partículas suspendidas. Es recomendable que el nivel de saturación magnética de las partículas sea grande para así obtener un buen fluido MR.

Las aleaciones de hierro y cobalto tienen uno de los mejores niveles de saturación magnética, alrededor de 2.4 teslas, pero el precio de este tipo de material es muy alto, por lo que no es muy utilizado para aplicaciones prácticas y comerciales; para las cuales se utilizan partículas de hierro carbono que tienen una saturación magnética de 2.15 teslas y un precio menor.

El tamaño de las partículas influye en la suspensión de las mismas en el fluido, por ello, cuanto menor sea el tamaño de las partículas la suspensión en el fluido es mucho mejor, favoreciendo la regulación de la dureza de amortiguación; por el contrario, cuanto mayor sea el tamaño de las partículas se hace más difícil la suspensión de las mismas en el fluido y por consiguiente la regulación de la amortiguación.

3.2 Modelado del Fluido magneto-reológico

Para representar matemáticamente el comportamiento de un fluido MR a menudo se utiliza el modelado de un plástico Bingham como se muestra en la figura 3.2; este describe satisfactoriamente las características del fluido magneto-reológico. En este modelo el esfuerzo cortante esta dado por:

$$\tau = \tau_{0(H)} + \mu \frac{\partial V}{\partial n}$$

donde:

$\tau_{0(H)}$ = esfuerzo cortante dependiente del campo magnético.

μ = coeficiente de viscosidad.

$\frac{\partial V}{\partial n}$ = velocidad de deformación del fluido.

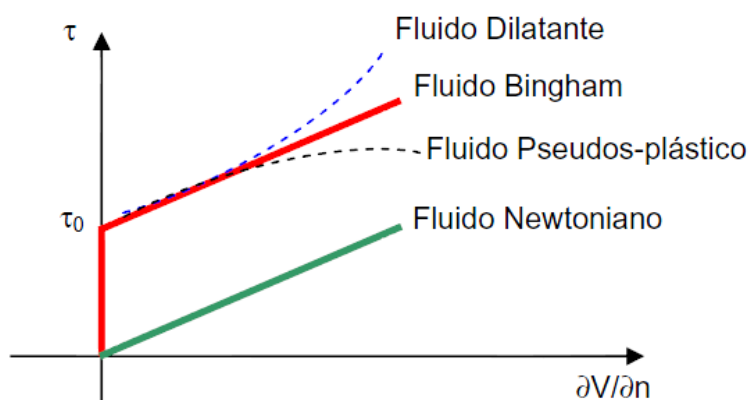


Figura 3. 2 Modelo visco-plástico de los fluidos MR

De lo anterior se deduce que la densidad de energía en los fluidos MR está limitado por la saturación magnética de las partículas de hierro. Un fluido MR tiene por lo general un valor máximo de densidad de energía de 0.1 Joule/cm^3 .

Para hacernos una idea de la ventaja de los fluidos MR en lo referente a la densidad de energía que puede proporcionar respecto a otros fluidos como por ejemplo los fluidos electroreológicos ER, dichos fluidos tienen una densidad de energía máxima de solo 0.001 Joule/cm^3 ; considerando que en ambos fluidos la viscosidad es casi la misma.

Esta es una de las razones más importantes por las que la utilización de los fluidos MR ha tenido una gran aceptación en la construcción de dispositivos amortiguadores. Otra ventaja es el esfuerzo cortante que se puede obtener de los fluidos MR con partículas suspendidas de hierro, que aproximadamente es de 100 kPa , frente a los fluidos ER que es de 2 a 5 kPa .

Si se considera la gran densidad magnética que nos ofrecen los fluidos MR podemos construir dispositivos de menores dimensiones con un gran rango de servicio. Los fluidos MR pueden operar en un rango de temperatura comprendidas entre -40° a 150°C teniendo una ligera variación en su esfuerzo cortante. Esto se debe a que la polarización magnética de las partículas de hierro suspendidas en el fluido no se ve apenas afectada por la temperatura.

Los fluidos MR tampoco se ven afectados por las impurezas que por lo general se producen durante el proceso de fabricación y el uso del dispositivo. Hay que destacar que la polarización magnética tampoco es afectada por los aditivos, al contrario, esto facilita la estabilidad en los fluidos MR contra la separación de las partículas, aunque las partículas y el líquido portador tengan una gran diferencia en sus densidades.

3.3 PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS

3.3.1 Propiedades reológicas

Las propiedades reológicas de este tipo de fluidos están determinadas por [14]:

- Concentración y densidad de las partículas.
- Distribución de forma y tamaño de las partículas.
- Las propiedades del fluido portador.
- Aditivos adicionales.
- La intensidad de campo magnético aplicado.

- La temperatura.
- Otros factores.

3.3.2 Propiedades magnéticas

Es esencial conocer las propiedades magnéticas de los fluidos magneto-reológicos para tener una visión de los posibles diseños de dispositivos en base a estos fluidos [15].

Los materiales super-paramagnéticos son los ideales para la construcción de este tipo de fluidos magneto-reológicos, su comportamiento en presencia de un campo magnético es muy conveniente para el funcionamiento esperado de los amortiguadores magneto-reológicos.

Una vez aplicado un campo magnético (figura 3.3) a un fluido magneto-reológico, la primera reacción es la alineación de las partículas suspendidas en la dirección del campo magnético aplicado, formando una estructura fibrosa que cambia las características del fluido.

Cuando se quita el campo magnético, y debido a que los materiales súper-paramagnéticos no tienen remanencia ni histéresis magnética, es decir, al quitar el campo magnético las partículas suspendidas en el fluido no quedan magnetizadas, el fluido magneto-reológico se comporta como un fluido newtoniano normal.

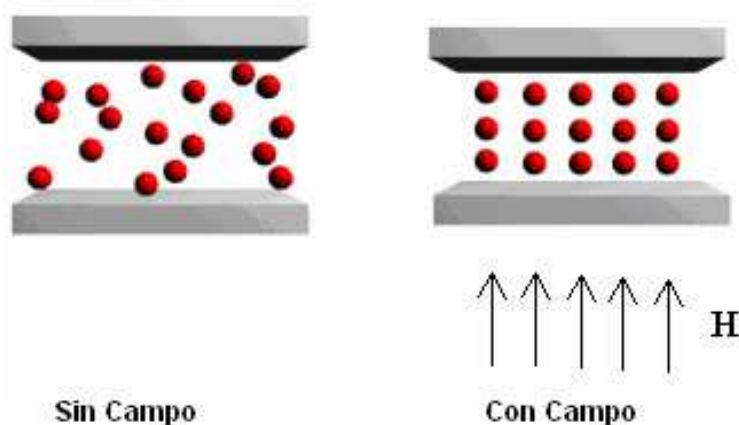


Figura 3. 3 Comportamiento partículas con y sin campo magnético

En la tabla 3.1 se enumeran algunas de las propiedades de los fluidos newtonianos.

Tabla 3. 1 Propiedades de los fluidos MR

<u>Propiedades</u>	<u>Magnitud</u>
Máximo esfuerzo cortante	$\tau_0(H)$ 50 a 100 kPa
Máximo campo magnético	$\cong 250$ kA/m
Viscosidad plástica aparente η	0.1 a 10 Pa-s
Rango temperatura de operación	-40 a 150 °C
Estabilidad	Insensible a la mayoría de impurezas
Densidad	3 a 4 g/cm ³
Máxima densidad de energía	0.1 Joule/cm ³
Suministro de energía	2 a 50 V, 1 a 2 A

3.4 APLICACIONES

Las áreas de aplicaciones de los fluidos magneto-reológicos son muy diversas, entre ellas cabe destacar [15]:

- **En el campo de la robótica**, el sistema nervioso de los futuros robots (figura 3.4) puede utilizar fluidos magneto-reológicos para mover las articulaciones y extremidades de forma semejante a los seres vivos.

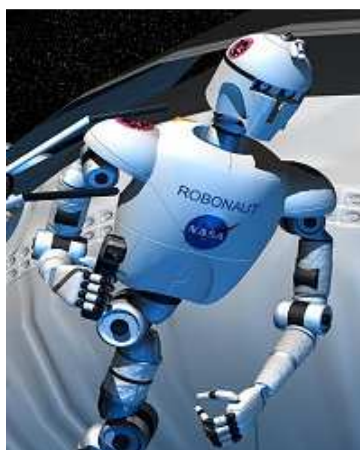


Figura 3. 4 Futuro robot articulado con fluido magneto-reológico

- **En el área automotriz**, se emplea en el sistema de suspensión, específicamente en los amortiguadores. El confort en los vehículos se asegura con estos amortiguadores magneto-reológicos, porque mediante un control electrónico se puede ajustar en una fracción de segundo la rigidez del amortiguador garantizando así un viaje cómodo y seguro.

También se usa en la suspensión de los asientos de los vehículos de trabajo pesado. En la figura 3.5 se muestra un amortiguador de fluido magneto-reológico diseñado para utilizarse en un sistema de suspensión de asiento semiactivo en vehículos de cargas para travesías largas.

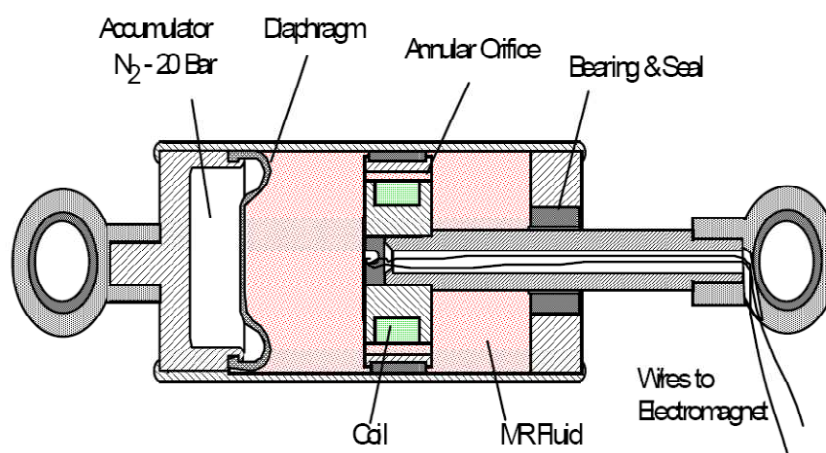


Figura 3. 5 Amortiguador de fluido magneto-reológico Rheonetic RD-1001-4

Este amortiguador es capaz de proveer un amplio rango dinámico de control de fuerza para niveles pequeños de potencia de entrada.

El uso de estos amortiguadores en suspensiones de asiento favorece un control en tiempo real de una posición óptima para ejercer la conducción. Esto se debe a que se consigue adaptar automáticamente el peso del cuerpo del conductor así como los niveles de choque y de vibración debidos al terreno por el que se circula.

De esta forma, se consigue un ambiente de trabajo más seguro, dado que se mejora la sensibilidad de la conducción, reduciendo la fatiga que se produce, y por tanto, reduciendo el nivel de riesgos de sufrir accidentes.

- **En las construcciones civiles**, la prueba del incremento en el crecimiento de la tecnología de dispositivos magneto-reológico es que se han diseñado y construido amortiguadores de tamaño apropiado para aplicaciones en ingeniería civil.

En la figura 3.6 se muestra un esquema de un amortiguador de fluido magneto-reológico de gran escala.

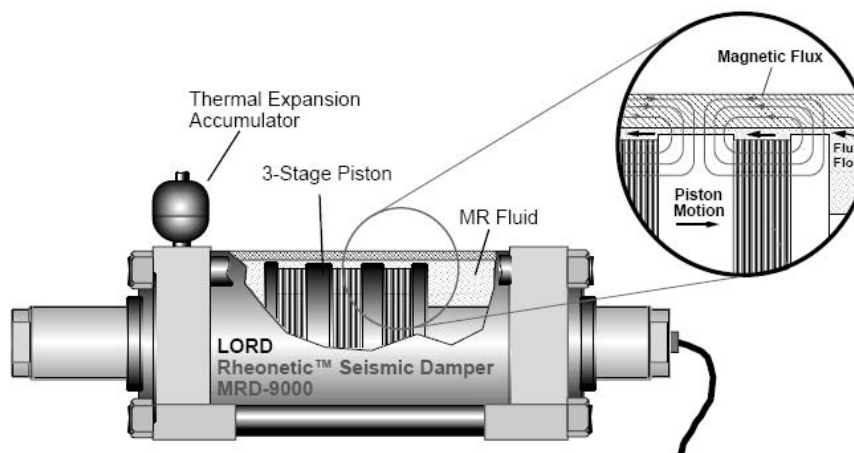


Figura 3. 6 Amortiguador sísmico Rheonetic MRD-9000

Una de las aplicaciones más frecuentes consiste en la protección sísmica de edificios, este hecho se debe a unas características muy determinadas de este tipo de amortiguadores. Estos amortiguadores amplían el control sobre los choques sísmicos iniciales como los de las réplicas gracias a su alta fuerza de disipación a baja velocidad, características que fundamentalmente actúan frente al choque de las réplicas.

No obstante, la reducción del choque inicial, se debe a su rápido tiempo de respuesta, así como a su alto margen dinámico, lo cual permite una optimización continua del sistema.

Otra de las aplicaciones civiles donde más se utiliza este tipo de dispositivos es el de los puentes suspendidos por cables, de esta forma, al situar los amortiguadores atados a los cables proporciona una situación continuamente controlable frente a las tensiones producidas por el viento y la lluvia.

En Japón ya se han instalado dispositivos en la construcción de edificios y puentes específicamente en el Museo Nacional de Ciencias Emergentes del Japón y en el puente del Lago Dong Ting en China (figura 3.7).



Figura 3. 7 Puente de Lago Dong Ting en china

- **En las prótesis médicas**, la principal aplicación de este tipo de amortiguadores en la industria médica se trata de la mejora en la movilidad de aquella pierna que fue amputada por encima de la rodilla.

Biederman Motech, un fabricante alemán de productos protésicos, desarrolló un sistema que aumenta el equilibrio del paso, la estabilidad y la eficiencia de la energía empleada al caminar (Figura 3.8).

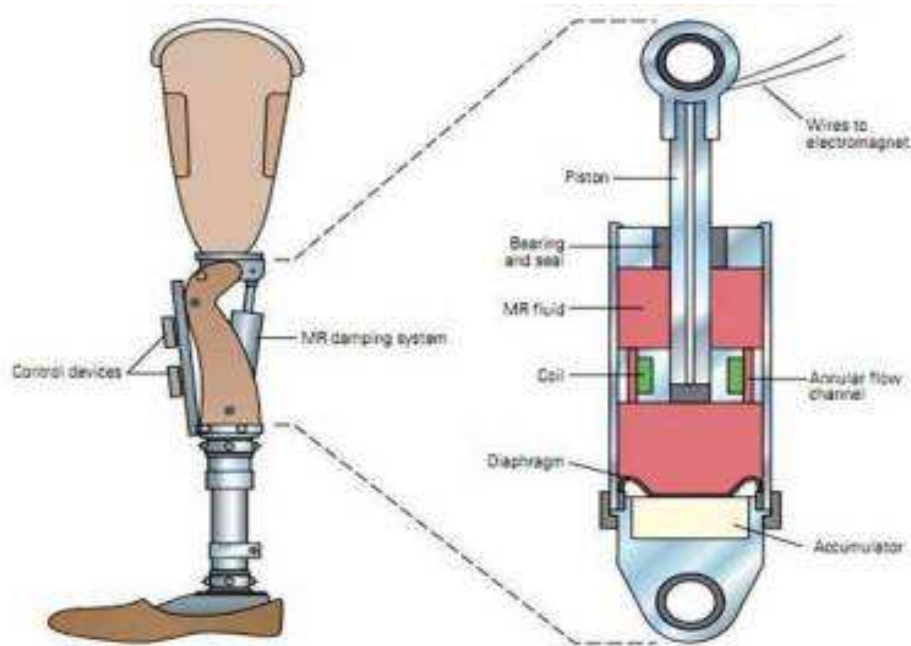


Figura 3. 8 Prótesis de pierna diseñada por Biederman Motech

Este sistema, aparte de disponer de un amortiguador, contenía un sistema de sensores que transferían la información a un programa informático, que a su vez transmitía la orden necesaria al amortiguador.

- **Los dispositivos y amortiguadores magneto-reológicos**, la máxima fuerza que un amortiguador MR puede dar depende de las propiedades del fluido MR, su diseño de circulación y el tamaño del amortiguador. Casi todos los dispositivos que usan fluidos MR pueden ser clasificados de acuerdo a su función en:

- Válvulas. Dispositivos que se encuentran dentro de un funcionamiento a modo de válvula pueden ser: servo-válvulas, amortiguadores y actuadores.
- Esfuerzo cortante directo. Dispositivos basados en el esfuerzo cortante directo pueden ser: embragues, frenos, compuertas, amortiguadores y compuestos para la construcción.
- Compresión. Dispositivos basados en la compresión se han usado en algunos amortiguadores para vibraciones de pequeña amplitud.
- Combinación de todos los anteriores.

CAPÍTULO 4: REDES NEURONALES ARTIFICIALES

4.1 Introducción

Las redes neuronales son un modelo artificial y simplificado del cerebro humano, cuya finalidad es la adquisición de conocimiento a través de la experiencia. Una red neuronal es un nuevo sistema para el tratamiento de la información, cuya unidad básica de procesamiento está inspirada en la célula fundamental del sistema nervioso humano: la neurona [16].

Una neurona recibe señales de todas las neuronas conectadas a ella. Estas señales se suman en el soma (núcleo de la neurona), la señal total (la suma) sale codificada como pulsos eléctricos. Dichos pulsos se propagan a lo largo del axón (fibra larga y delgada) y pasan a otra neurona. Previamente, la señal es reforzada o debilitada, es decir el impulso que sale de una neurona no es igual al que entra en la siguiente neurona.

Las redes neuronales son una forma de emular ciertas características propias de los humanos, como la capacidad de memorizar y de asociar hechos. Todos los problemas que no pueden expresarse a través de un algoritmo pueden ser resueltos por medio de la experiencia.

Todos los procesos del cuerpo humano se relacionan de alguna u otra forma con la actividad o inactividad de sus neuronas.

El funcionamiento de una neurona biológica es el siguiente: la neurona es estimulada o excitada a través de sus entradas (*inputs*) y cuando se alcanza un cierto umbral, la neurona se dispara o activa, pasando una señal hacia el axón. La figura 4.1 muestra el modelo de neurona biológica.

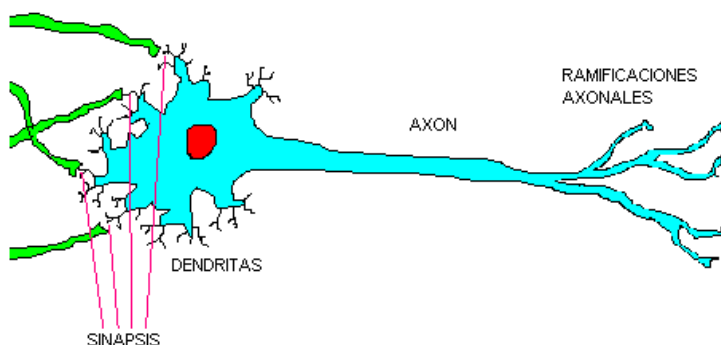


Figura 4. 1 Modelo de una neurona biológica

Las dendritas son la vía de entrada de las señales que se combinan en el cuerpo de la neurona. De alguna manera la neurona elabora una señal de salida a partir de ellas.

El axón es el camino de salida de la señal generada por la neurona. Las sinapsis son las unidades funcionales y estructurales elementales que median entre las interacciones de las neuronas.

4.2 Definición de red neuronal artificial

Una red neuronal artificial (RNA) es un modelo computacional inspirado en redes neuronales biológicas que pueden ser consideradas como un sistema de procesamiento de información con características como aprendizaje a través de ejemplos, adaptabilidad, robustez, capacidad de generalización y tolerancia a fallos [17].

Se considera una estructura distribuida, de procesamiento paralelo, formada de neuronas artificiales o elementos de procesamiento, interconectados por un gran número de conexiones (sinapsis), los cuales son usados para almacenar conocimiento que está disponible para poder ser usado.

Por lo tanto una RNA se caracteriza por:

- Ser unidades de procesamiento que intercambian datos o información.
- Se utilizan para reconocer patrones, incluyendo imágenes, manuscritos y secuencias de tiempo.
- Tienen capacidad de aprender y mejorar su funcionamiento.

4.3 Elementos básicos que componen una red neuronal

La estructura de una red neuronal está caracterizada por las conexiones de unas unidades con otras que se disponen en forma de capas [17].

Como podemos ver en la figura 4.2, los diferentes tipos de capa que existen son:

- **Capa de entrada:** Las neuronas que pertenecen a este grupo, no reciben como entrada la salida de ninguna otra neurona y, su salida es la entrada a otras neuronas de la red. Por tanto, esta capa actúa como entrada al sistema.
- **Capa de salida:** Las neuronas situadas en esta capa, reciben como entrada la salida de otras neuronas pero no es la entrada de ninguna otra capa. Por lo tanto, se tratan de salidas de la información para que puedan estas ser leídas.
- **Capa oculta o intermedia:** una red neuronal puede estar formada por varias capas ocultas. Reciben como señal la salida de otras neuronas y, a su vez, su salida es la entrada de otra capa sucesiva. Son las encargadas de extraer,

procesar y memorizar la información concerniente al problema estudiado, basándose para ello principalmente en los pesos de las conexiones de la red.

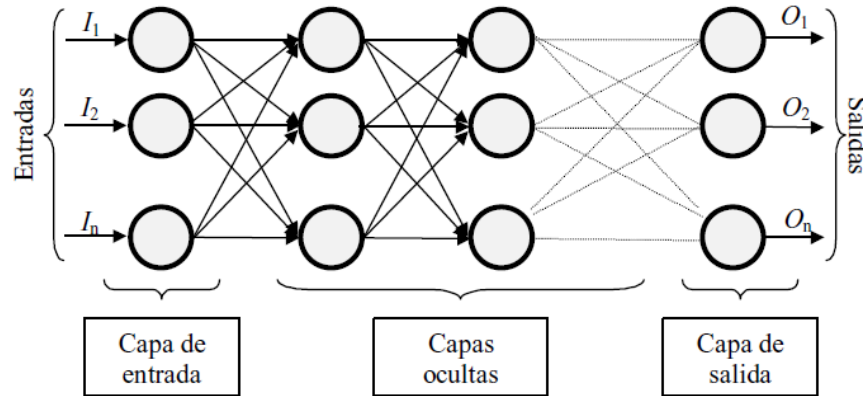


Figura 4. 2 Esquema de una red neuronal completa

4.3.1 Función de entrada

La función de entrada se conoce como función de propagación o ponderación, y se encarga de transformar las diferentes entradas que provienen de la sinapsis en el potencial de la neurona.

Algunas de las funciones de entrada más utilizadas y conocidas son:

- Suma de todos los valores de entrada a la neurona, multiplicados por sus correspondientes pesos:

$$\sum_j (n_{ij} w_{ij}), \quad \text{con } j = 1, 2, \dots, n \quad (4.1)$$

- Producto de todos los valores de entrada a la neurona, multiplicados por sus correspondientes pesos:

$$\prod_j (n_{ij} w_{ij}), \quad \text{con } j = 1, 2, \dots, n \quad (4.2)$$

- Máximo de las entradas pesadas: solamente toma en consideración el valor de entrada más fuerte, previamente multiplicado por su peso correspondiente:

$$\text{Max}_j (n_{ij} w_{ij}), \quad \text{con } j = 1, 2, \dots, n \quad (4.3)$$

4.3.2 Función de activación

La función de activación es la característica principal de una neurona. Se encarga de calcular el nivel o estado de activación de la neurona en función de la entrada total a la misma.

Las funciones más comunes son las siguientes [18]:

- a) **Lineal:** La activación de la neurona es proporcional a la entrada total. La función lineal más típica es la que se muestra en la figura 4.3.

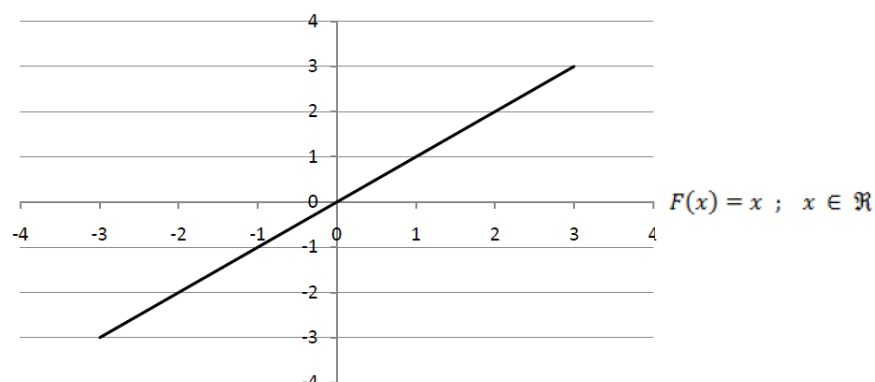


Figura 4. 3 Función de activación lineal

Este tipo de función produce comportamientos neuronales inestables debido a que sus activaciones tienden a incrementarse sin límites. Lo ideal es que la función de activación tenga umbral para que cuando el estímulo total exceda de un cierto valor la salida sea constante.

- b) **Escalón:** La activación es un valor discreto, (0,1) que depende de si la entrada total supera o no un determinado umbral. Presenta el inconveniente de no ser derivable en cero, por lo tanto, se limita su capacidad de aprendizaje y representación.

De este tipo son la función signo (figura 4.4) y la función escalón (figura 4.5).

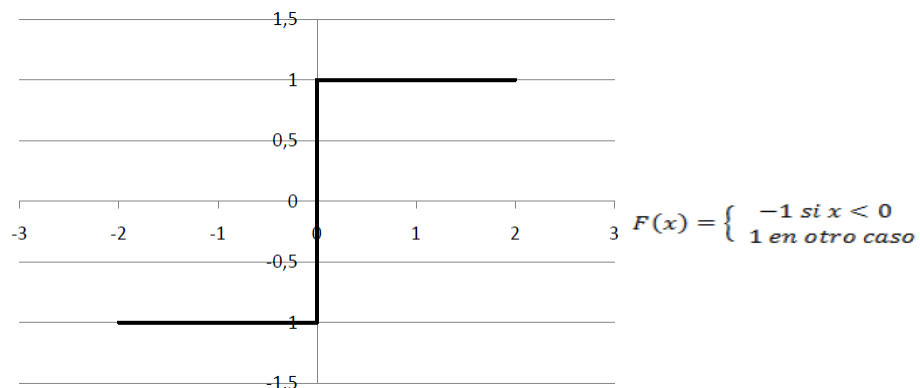


Figura 4. 4 Función de activación tipo signo

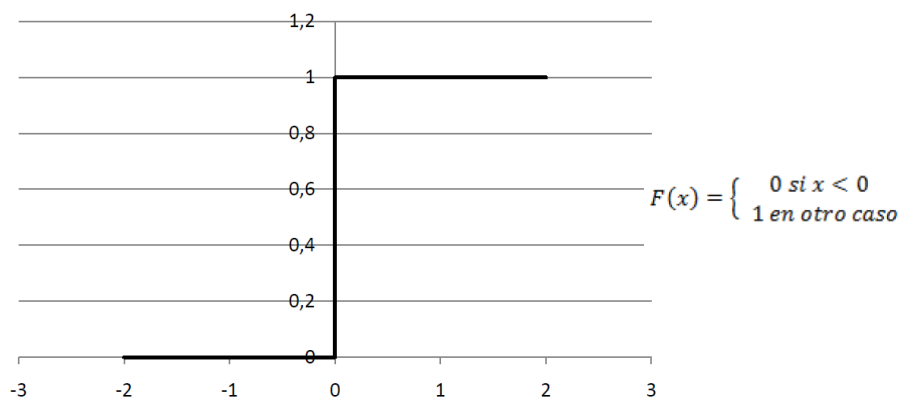


Figura 4. 5 Función de activación tipo escalón

- c) **No lineales:** En las funciones no lineales, la salida no es proporcional a la entrada. Las redes con salida continua usan esta función ya que su algoritmo de aprendizaje necesita una función derivable. En este grupo destacan la función logística (figura 4.6) y la función tangente hiperbólica (figura 4.7).

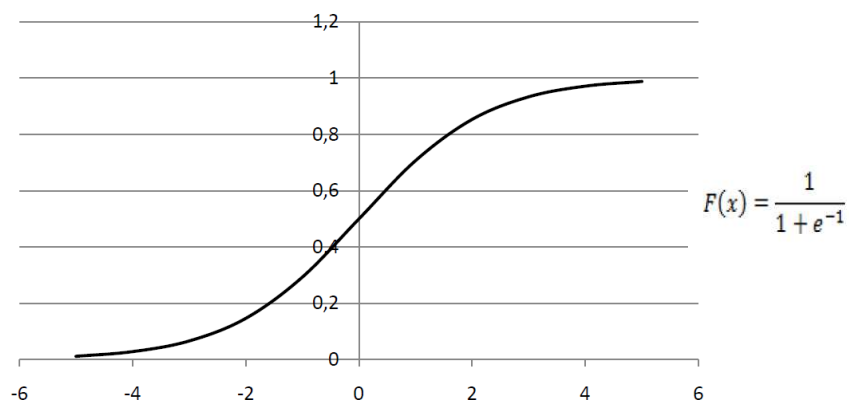


Figura 4. 6 Función de activación logística

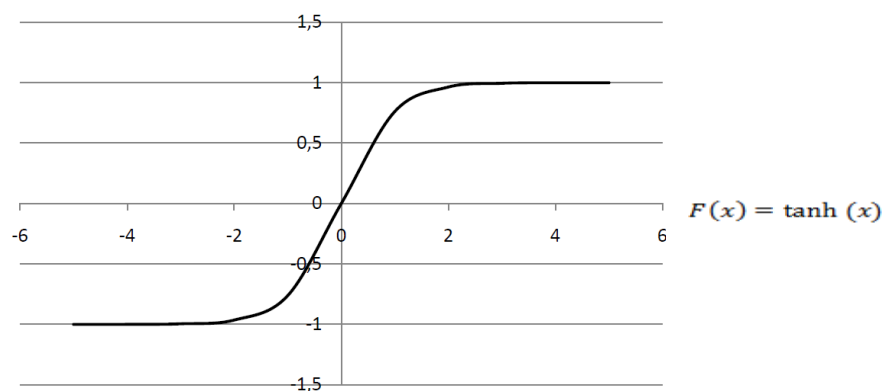


Figura 4. 7 Función de activación tangente hiperbólica

4.3.3 Función de salida

La función de salida convierte el estado de la neurona en la salida hacia la siguiente neurona que se transmite por la sinapsis (figura 4.8). Generalmente, no se considera y se toma la identidad, de manera que la salida es el propio estado de activación de la neurona, $Z_j = Y_j$

Existen algunas redes que transforman su estado de activación en una salida binaria y para eso usan la función escalón como salida.

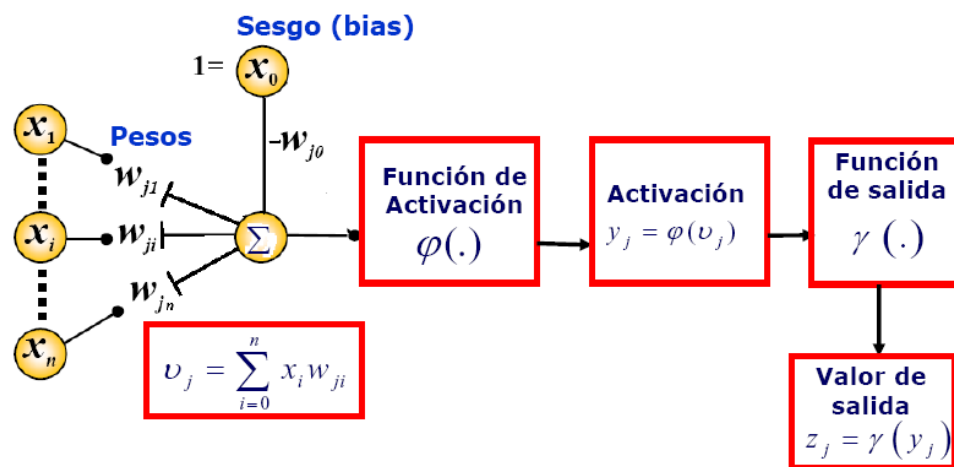


Figura 4. 8 Funcionamiento de una neurona de la red

4.4 Modo de operación

El *modo de operación* se refiere a la manera en que la red neuronal procesa los estímulos externos y crea la respuesta de salida. Puede considerarse a una red neuronal como perteneciente a una de estas dos categorías:

- **Red estática:** En este tipo de red, una vez establecido el valor de las entradas, las salidas alcanzan un valor estacionario independientemente de las entradas en el instante anterior, y en un tiempo siempre por debajo de una determinada cota. Estas redes se pueden caracterizar estructuralmente por la inexistencia de bucles de realimentación y de elementos de retardo entre los distintos elementos de proceso que las forman. Debido a su modo de funcionamiento, estas redes tienen una capacidad limitada para sintetizar funciones dependientes del tiempo en comparación con las redes binarias.
- **Red dinámica:** Este tipo de redes responde de manera diferente ante diferentes secuencias de entradas, haciendo uso de manera implícita o explícita de la variable tiempo. Dicho aspecto las hace más idóneas que las redes estáticas para la síntesis de funciones en las que aparezca de alguna manera el parámetro tiempo.

Es posible considerar también varias opciones en cuanto a la manera en que se realiza la realimentación:

- Realimentación de la salida, si las salidas generadas por la red son realimentadas a las capas anteriores.
- Realimentación del estado, si la realimentación se produce con las salidas producidas en las capas ocultas.

Las redes con realimentación plantean problemas de convergencia y estabilidad, que son por lo general de difícil análisis.

4.5 Operaciones de capa

Las operaciones de capa afectan a la capa como si fuera un todo. En principio se considerarán las siguientes:

- **Normalización:** Cada elemento de proceso de la capa considerada ajusta su salida para dar un nivel constante de actividad (considerando las salidas de todos los elementos de proceso que forman la capa).
- **Competencia:** Sólo uno o unos pocos elementos de proceso de una capa ganan y producen salida, inhibiendo la generación de las salidas en el resto.

4.6 Otras consideraciones

También es posible caracterizar las redes neuronales teniendo en cuenta la forma de operar a la hora de generar la salida o al actualizar los pesos. Así se tiene:

- **Operación síncrona:** Se dice que una red neuronal opera de forma síncrona cuando todos los elementos de proceso del sistema generan la salida a la vez.
- **Operación asíncrona:** Se dice que una red opera de forma asíncrona cuando los elementos de proceso que la constituyen generan la salida aleatoriamente e independientemente unos de otros. En estos casos puede añadirse a los elementos de proceso entradas de control que indiquen cuando han de ser actualizados los pesos de sus conexiones con los otros elementos de proceso.

Hay que tener en cuenta que, en muchos modelos de redes, la actualización de los pesos requiere la ejecución de la red a fin de calcular el correspondiente error, por lo que el cambio en el valor de los pesos también queda influido por el modo de operación síncrona o asíncrona.

4.7 Mecanismos de aprendizaje

Los datos de entrada son procesados por la red neuronal con la intención de obtener una salida. Las redes neuronales memorizan los ejemplos anteriores para extraer generalizaciones. Una red neuronal debe aprender a calcular la salida correcta para cada entrada o grupos de entrada, a este proceso de aprendizaje se le denomina proceso de entrenamiento. Al conjunto de datos o ejemplos en el que se basa este proceso se denomina conjunto de datos de entrenamiento.

La topología de la red y las diferentes funciones de cada neurona, bien sea entrada, activación o salida, han de permanecer constantes durante todo el aprendizaje, mientras que los pesos sobre cada una de las conexiones no, es por ello que la clave del aprendizaje de una red neuronal está en la adaptación de los pesos.

El aprendizaje es el proceso por el cual una red neuronal modifica sus pesos en respuesta a una información de entrada. Los cambios que se producen durante el mismo se reducen a la destrucción, modificación y creación de conexiones entre las neuronas.

En los sistemas biológicos, existe una continua destrucción y creación de conexiones entre las neuronas. En los modelos de redes neuronales artificiales un peso con valor distinto de cero supone la creación de una nueva conexión, mientras que un peso de valor cero rompe la conexión.

Durante el proceso de aprendizaje los pesos de las conexiones varían. Se puede decir que el proceso de aprendizaje de la red ha terminado cuando los valores de los pesos permanecen estables:

$$\frac{\delta w_{ij}}{\delta t} = 0$$

Para el aprendizaje de las redes neuronales es importante conocer cuáles son los criterios que se siguen para cambiar el valor asignado a los pesos (las conexiones).

Existen tres métodos de aprendizaje importantes [19]:

- Aprendizaje supervisado.
- Aprendizaje no supervisado.
- Aprendizaje por refuerzo.

4.7.1 Aprendizaje supervisado

El aprendizaje supervisado se caracteriza porque el proceso de aprendizaje se realiza mediante un entrenamiento controlado por un agente externo que determina la

respuesta que debería generar la red a partir de una entrada determinada. Se controla la salida de la red y en caso de que ésta no coincida con la deseada, se procederá a modificar los pesos de las conexiones, con el fin de conseguir que la salida obtenida se aproxime lo máximo posible a la deseada.

Dentro del aprendizaje supervisado podemos encontrar:

- **Aprendizaje por corrección del error** consiste en ajustar los pesos de las conexiones de la red en función de la diferencia entre los valores deseados y los obtenidos a la salida de la red (en función del error cometido en la salida).

Un ejemplo de este tipo de algoritmos lo constituye la regla de aprendizaje del Perceptron. En esta regla de aprendizaje, para cada neurona en la capa de salida se calcula la desviación a la salida conocida como el error (δ), con el objetivo de utilizarlo para modificar los pesos en la conexión de la neurona precedente. El cambio de los pesos por medio de la regla de aprendizaje del Perceptron se realiza según la siguiente regla:

$$\Delta w_{ij} = \sigma * out_j * (a_{qi} - out_i);$$

donde: a_{qi} es la salida deseada/objetivo de la neurona de salida N_i , $\delta_i = (a_{qi} - out_i)$ la desviación objetivo de la neurona N_i y σ el aprendizaje.

La salida de la neurona N_j (out_j) se utiliza, porque este valor influye en la entrada global y, por tanto, en la activación y luego en la salida de la neurona N_i . Esto es semejante a un “efecto en cadena”. Ver *Figura 4.9*

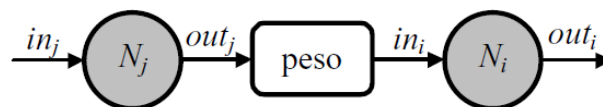


Figura 4. 9 Influencia de la salida de la neurona N_j en la entrada de la neurona N_i

Otro algoritmo muy conocido y que pertenece a esta clasificación es la regla de aprendizaje Delta o regla del mínimo error cuadrado (*LMS Error: Least Mean Squared Error*), al igual que la anterior también utiliza la desviación a la salida, pero toma en consideración a todas las neuronas predecesoras que tiene la neurona de salida. Esto permite cuantificar el error global cometido en cualquier momento durante el proceso de entrenamiento de la red, lo cual es importante, ya que cuanto más información se tenga sobre el error cometido, más rápido se puede aprender. Por lo que el error calculado (δ) es igualmente repartido entre las conexiones de las neuronas predecesoras.

Hay que destacar la regla de aprendizaje de propagación hacia atrás o de *Backpropagation*, también conocido como regla LMS multicapa, la cual es una generalización de la regla de aprendizaje Delta y será analizada más adelante con mayor detalle ya que será empleada para el entrenamiento de la red con los resultados obtenidos de los ensayos en el laboratorio.

- **El aprendizaje por refuerzo** se trata de un aprendizaje supervisado, más lento que el anterior, se basa en la idea de no disponer de un ejemplo completo del comportamiento deseado, es decir, de no indicar durante el entrenamiento exactamente la salida que se desea que proporcione la red ante una determinada entrada. En este tipo de aprendizaje la función del supervisor se reduce a indicar mediante una señal de refuerzo si la salida obtenida en la red se ajusta a la deseada (éxito = +1 ó fracaso = -1)

- **El aprendizaje estocástico** consiste en realizar cambios aleatorios en los valores de los pesos de las conexiones de la red y evaluar su efecto a partir del objetivo deseado y de distribuciones de probabilidad.

4.7.2 Aprendizaje no supervisado

Las redes con aprendizaje no supervisado o autosupervisado, no precisan influencia externa para ajustar los pesos de las conexiones entre sus neuronas. La red no recibe ninguna información por parte del entorno que le indique si la salida generada en respuesta a una determinada entrada es o no correcta. Estas redes deben encontrar las características, regularidades, correlaciones o categorías que se puedan establecer entre los datos que se presenten en su entrada.

Existen varias posibilidades en cuanto a la interpretación de la salida de estas redes, que dependen de su estructura y del algoritmo de aprendizaje empleado.

Se suelen considerar dos tipos de algoritmos de aprendizaje no supervisado:

- **Aprendizaje hebbiano.**

La regla de aprendizaje hebbiano pretende extraer características de los datos de entrada. Se basa en que si dos neuronas N_i y N_j toman el mismo estado simultáneamente (ambas activas o ambas inactivas), el peso de la conexión entre ambas se incrementa. Las neuronas son binarias por lo que las entradas y salidas permitidas a la neurona son: $\{-1, 1\}$ o $\{0, 1\}$. Esto se debe a que la regla de aprendizaje de Hebb se originó a partir de la neurona biológica clásica, que solamente puede estar activa o inactiva.

- **Aprendizaje competitivo y comparativo.**

El aprendizaje comparativo y competitivo se orienta a la clasificación de los datos de entrada. Como característica principal del aprendizaje competitivo se puede decir que, si un patrón nuevo se determina que pertenece a una clase reconocida previamente, entonces la inclusión de este nuevo patrón a esta clase matizará la representación de la misma. Si el patrón de entrada se determinó que no pertenece a ninguna de las clases reconocidas anteriormente, entonces la estructura y los pesos de la red neuronal serán ajustados para reconocer la nueva clase.

4.7.3 Aprendizaje *on-line* y *off-line*

Otro criterio que se puede utilizar para diferenciar las reglas de aprendizaje se basa en considerar si la red puede aprender durante su funcionamiento habitual o si el aprendizaje supone la inhabilitación de la red hasta que el proceso termine.

En el primer caso, se trataría de un aprendizaje *on-line*, mientras que el segundo es lo que se conoce como *off-line*. Cuando el aprendizaje es *off-line*, se distingue entre una fase de aprendizaje o entrenamiento y una fase de operación o funcionamiento, existiendo un conjunto de datos de entrenamiento y un conjunto de datos de test o prueba, que serán utilizados en la correspondiente fase. Una vez terminada la etapa de entrenamiento de la red los pesos de las conexiones permanecen fijos. Debido a su carácter estático, estos sistemas no presentan problemas de estabilidad en su funcionamiento.

CAPÍTULO 5: ALGORITMO DE APRENDIZAJE BACKPROPAGATION

5.1 Introducción

El algoritmo de aprendizaje de *Backpropagation* es un tipo de regla de aprendizaje supervisado, que emplea ciclos de propagación. Una vez que se ha aplicado un patrón a la entrada de la red como estímulo, este se propaga desde la primera capa a través de las capas intermedias de la red, hasta generar una salida. La señal de salida se compara con la salida deseada y se calcula el error para cada una de las ellas [20].

El error se propaga hacia atrás, desde la capa de salida hacia todas las neuronas de la capa oculta. Sin embargo, las neuronas de la capa oculta sólo reciben una fracción de la señal total del error, basándose en la contribución relativa que haya aportado cada neurona en la salida original. Este proceso se repite, capa por capa, hasta que todas las neuronas de la red hayan recibido una señal de error que describa su contribución relativa al error total. Basándose en la señal de error percibida, se actualizan los pesos de conexión de cada neurona, para hacer que la red converja hacia un estado que permita clasificar correctamente todos los patrones de entrenamiento.

La clave de este proceso se encuentra en que, a medida que se entrena la red, las neuronas de las capas intermedias se organizan a sí mismas de tal modo que las distintas neuronas aprenden a reconocer características de entrada. Tras el entrenamiento, cuando se les presente un patrón arbitrario de entrada que esté incompleto, las neuronas de la capa oculta de la red responderán con una salida activa si la nueva entrada contiene un patrón que se asemeje a aquella característica que las neuronas hayan aprendido a reconocer durante su entrenamiento. Y a la inversa, las unidades de las capas ocultas tienen una tendencia a inhibir su salida si el patrón de entrada no contiene la característica para la que han sido entrenadas.

Varias investigaciones han demostrado que, durante el proceso de entrenamiento, la red *Backpropagation* tiende a desarrollar relaciones internas entre neuronas con el fin de organizar los datos de entrenamiento en clases. Esta tendencia se puede extrapolar, para llegar a la hipótesis de que todas las unidades de la capa oculta de una *Backpropagation* son asociadas de alguna manera a características específicas del patrón de entrada como consecuencia del entrenamiento. La asociación puede no resultar evidente para el observador humano, lo importante es que la red ha encontrado una representación interna que le permite generar las salidas deseadas cuando se le ofrece las entradas, en el proceso de entrenamiento. Esta misma representación interna se puede aplicar a entradas que la red no haya visto antes, y la red las clasificará según las características que comparten con los ejemplos de entrenamiento.

5.2 Regla de Aprendizaje

El algoritmo *Backpropagation* para redes multicapa actualiza los pesos y ganancias basándose en el error medio cuadrático. La red *Backpropagation* trabaja bajo aprendizaje supervisado y por tanto necesita un conjunto de entrenamiento que le escriba cada entrada y su valor de salida esperado de la siguiente forma:

$$\{p_1, t_1\}, \{p_2, t_2\}, \dots, \{p_Q, t_Q\}$$

Donde p_Q es una entrada a la red y t_Q es la correspondiente salida deseada para el patrón q -ésimo. El algoritmo debe ajustar los parámetros de la red para minimizar el error medio cuadrático.

El entrenamiento de una red neuronal multicapa se realiza mediante un proceso de aprendizaje, que antes de empezar debe tener definida la tipología de la red esto es: número de neuronas en la capa de entrada que depende del número de componentes del vector de entrada, número de capas ocultas y número de neuronas de cada una de ellas, número de neuronas en la capa de la salida que depende del número de componentes del vector de salida o patrones objetivo y funciones de transferencia requeridas en cada capa.

Con base a la tipología escogida, se asignan valores iniciales a cada uno de los parámetros que conforman la red.

Hasta ahora no existe una técnica para determinar el número de capas ocultas, ni el número de neuronas que debe contener cada una de ellas para un problema específico, esa elección es determinada por la experiencia del diseñador, el cual debe cumplir con las limitaciones de tipo computacional y considerar que cuantas más capas ocultas el aprendizaje será más complejo y en la etapa de funcionamiento la respuesta tardará más en generarse, pero gracias a los potentes procesadores que existen actualmente la respuesta es instantánea.

Cada patrón de entrenamiento se propaga a través de la red y sus parámetros para producir una respuesta en la capa de salida, la cual se compara con los patrones objetivo o salidas deseadas para calcular el error en el aprendizaje. Este error marca el camino más adecuado para la actualización de los pesos y ganancias que al final del entrenamiento producirán una respuesta satisfactoria a todos los patrones de entrenamiento. Esto se logra minimizando el error medio cuadrático en cada iteración del proceso de aprendizaje.

Cuando se presenta a la red un patrón de entrenamiento, este se propaga a través de las conexiones existentes produciendo una entrada n en cada una de las neuronas de la siguiente capa. La entrada a la neurona j de la siguiente capa se debe a la presencia de un patrón de entrenamiento en la entrada:

$$n_j^0 = \sum_{i=1}^q W_{ji}^0 + b_j^0 \quad (5.1)$$

donde:

- W_{ji}^0 es el peso que une la componente i de la entrada con la neurona j de la primera capa oculta.
- p_i es la componente i del vector p que contiene el patrón de entrenamiento de q componentes.
- b_j^0 es la ganancia de la neurona j de la capa oculta.

El superíndice (0) representa la capa a la que pertenece cada parámetro, en este caso a la capa oculta.

Cada una de las neuronas de la capa oculta tiene como salida a_j^0 que está dada por la ecuación:

$$a_j^0 = f^0 \sum_{i=1}^q W_{ji}^0 p_i + b_j^0 \quad (5.2)$$

donde f^0 es la función de transferencia de las neuronas de la capa oculta.

Las salidas a_j^0 de las neuronas de la capa oculta son las entradas a los pesos de conexión de la capa de salida, $a_k^0 \rightarrow n_k^s$, este comportamiento está descrito por la ecuación:

$$n_k^s = \sum_{j=1}^m W_{kj}^s a_j^0 + b_k^s \quad (5.3)$$

donde:

- W_{kj}^s es el peso que une la neurona j de la capa oculta con la neurona k de la capa de salida, la cual cuenta con s neuronas.
- a_j^0 es la salida de la neurona j de la capa oculta, la cual cuenta con m neuronas.
- b_k^s es la ganancia de la neurona k de la capa de salida.
- N_k^s es la entrada a la neurona k de la capa de salida.

La red produce una salida final descrita por la ecuación:

$$a_k^s = f^s(n_k^s) \quad (5.4)$$

donde f^s es la función de transferencia de las neuronas de la capa de salida.

A partir de las ecuaciones 5.3 y 5.4 se obtiene la salida de la red en función de la entrada y de los pesos de conexión con la última capa oculta:

$$a_k^s = f^s\left(\sum_{j=1}^m W_{ki}^s a_j + b_k^s\right) \quad (5.5)$$

La salida de la red de cada neurona se compara con la salida deseada para calcular el error en cada unidad de salida:

$$\delta_k = (t_k - a_k^s) \quad (5.6)$$

El error debido a cada patrón p propagado está dado por:

$$ep^2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^s (\delta_k)^2 \quad (5.7)$$

donde:

- δ_k es el error en la neurona k de la capa de salida.

Este proceso se repite para el número total de patrones de entrenamiento (r). Para un proceso de aprendizaje, el objetivo del algoritmo es actualizar todos los pesos y ganancias de la red minimizando el error medio cuadrático total:

$$e^2 = \sum_{p=1}^r ep^2 \quad (5.8)$$

donde:

- e^2 es el error total en el proceso de aprendizaje en una iteración, después de haber presentado a la red los r patrones de entrenamiento.

El error que genera una red neuronal en función de sus pesos, genera un espacio de n dimensiones, donde n es el número de pesos de conexión de la red. Al evaluar el gradiente del error en un punto de esta superficie se obtendrá la dirección en la cual la función del error tendrá un mayor crecimiento.

Como el objetivo del proceso de aprendizaje es minimizar el error, debe tomarse la dirección negativa del gradiente para obtener el mayor decremento del error y de esta forma su minimización, condición requerida para realizar la actualización de la matriz de pesos en el algoritmo *Backpropagation*:

$$W_{k+1} = W_k - \alpha \nabla e p^2 \quad (5.9)$$

Después de encontrar el valor del gradiente del error, se procede a actualizar los pesos de todas las capas empezando por la de salida. Para la capa de salida la actualización de pesos y ganancias está dada por:

$$W_{kj}(t+1) = W_{kj}(t) - 2\alpha \delta_k^s \quad (5.10)$$

$$b_k(t+1) = b_k(t) - 2\alpha \delta_k^s \quad (5.11)$$

donde:

- α es el parámetro de aprendizaje que define la velocidad de aprendizaje.

Después de actualizar los pesos y ganancias de la capa de salida se procede a actualizar los pesos y ganancias de la capa oculta mediante las ecuaciones:

$$W_{ji}(t+1) = W_{ji}(t) - 2\alpha \delta_j^o p_i \quad (5.12)$$

$$b_j(t+1) = b_j(t) - 2\alpha \delta_j^o \quad (5.13)$$

Esta deducción fue realizada para una red de tres capas.

En las técnicas de gradiente descendiente es conveniente avanzar por la superficie de error con incrementos pequeños de los pesos; esto se debe a que se tiene una información local de la superficie y no se sabe lo lejos o lo cerca que se está del punto mínimo, con incrementos grandes, se corre el riesgo de pasar por encima del punto mínimo; con incrementos pequeños, aunque se tarde más en llegar, se evita que esto ocurra.

La elección de un incremento adecuado influye en la velocidad de convergencia del algoritmo, esta velocidad se controla a través del parámetro de aprendizaje α , el cual, por lo general, se escoge como un número pequeño, para asegurar que la red encuentre una solución. Un valor pequeño de α significa que la red tendrá que hacer un gran número de iteraciones. Si se toma un valor muy grande, los cambios en los pesos serán muy grandes, avanzando muy rápidamente por la superficie de error, con el riesgo de saltar el valor mínimo del error y estar oscilando alrededor de él, pero sin poder alcanzarlo.

Es recomendable disminuir el valor de α a medida que disminuye el error de la red durante la fase de entrenamiento, para garantizar así una rápida convergencia, teniendo la precaución de no tomar valores demasiado grandes que hagan que la red oscile alejándose demasiado del valor mínimo.

En el desarrollo matemático que se ha realizado para llegar al algoritmo *Backpropagation*, no se asegura en ningún momento que el mínimo que se encuentre sea global. En todo caso, si la solución es admisible desde el punto de vista del error, no importa si el mínimo es local o global o si se ha detenido en algún momento previo a alcanzar un verdadero mínimo.

A continuación se expondrá de forma gráfica la deducción matemática alcanzada en el punto anterior. Para ello se utilizará una red formada por dos entradas, una salida y dos capas ocultas de neuronas. La estructura de red utilizada se observa en la figura 5.1 [21].

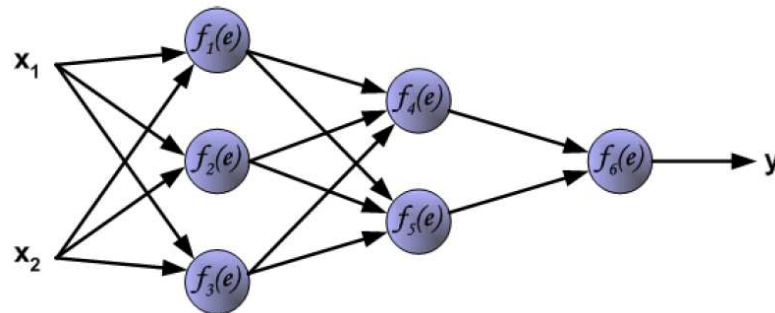


Figura 5. 1 Estructura de una red

Cada neurona está compuesta por dos unidades; la primera unidad representa el coeficiente de pesos de las neuronas de entrada, mientras que la segunda unidad representa la función de activación de la neurona (figura 5.2), donde e es la suma de las señales de entrada, mientras que $y=f(e)$ es la función de salida.

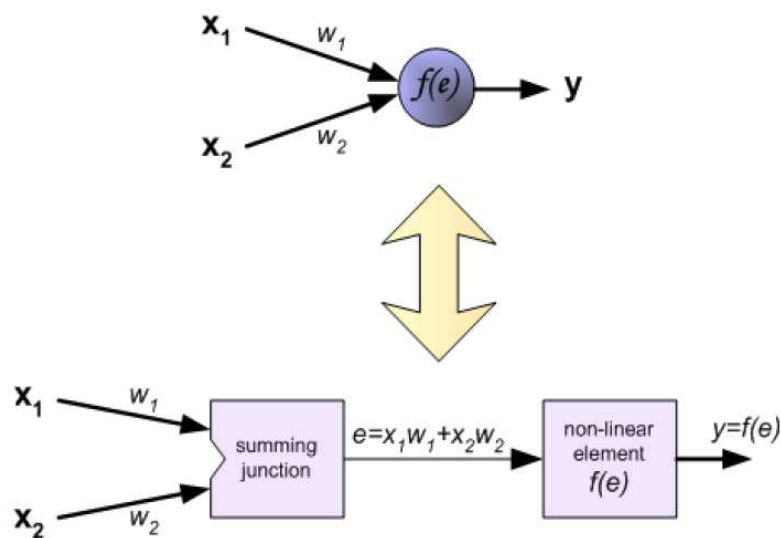


Figura 5. 2 Componentes de una neurona

Se trata de un proceso iterativo y en cada iteración los coeficientes de los pesos son modificados usando los datos de entrenamiento. La modificación se calcula usando el procedimiento descrito a continuación: cada ciclo comienza con las señales de entrada en una neurona entrada (x_1 y x_2), formándose la señal de salida de dicha neurona, y así se puede determinar la salida para cada capa.

La figura 5.3 muestra la propagación de la señal a través de la red, donde $w_{(xm)n}$ representa los pesos de cada neurona x_m de la capa n , e y_n representa la señal de salida de la neurona n .

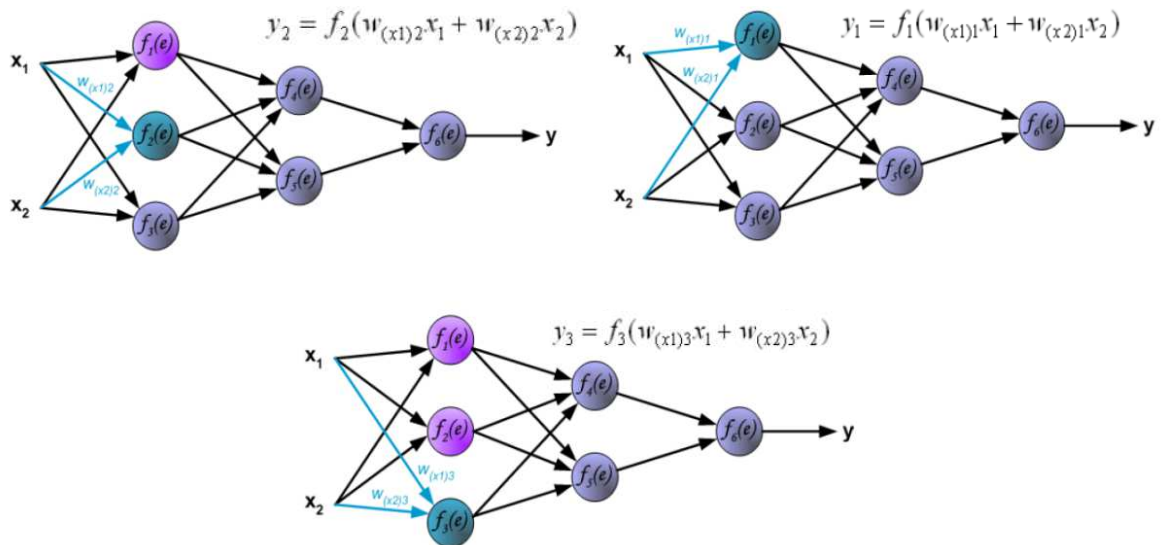


Figura 5. 3 Reparto de pesos en la primera capa de neuronas

La señal de propagación atraviesa la capa oculta como se puede observar en la figura 5.4, donde w_{mn} representa los pesos de conexiones entre la salida de la neurona m y la entrada de la neurona n de la siguiente capa. La señal continúa propagándose hasta alcanzar la capa de salida (figura 5.5).

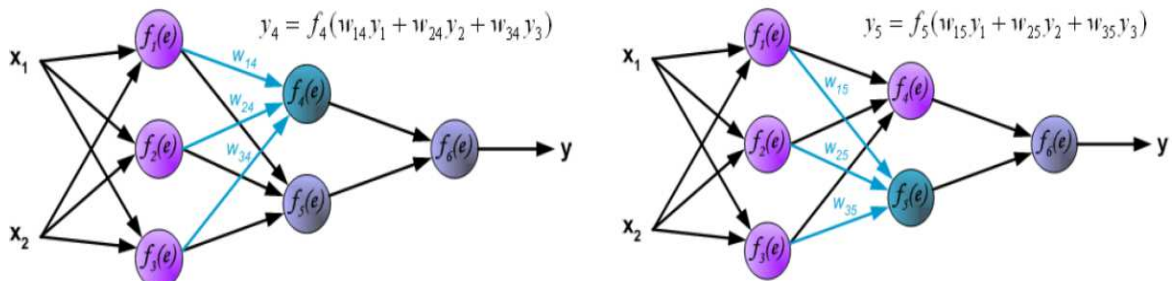


Figura 5. 4 Reparto de pesos en la segunda capa de neuronas

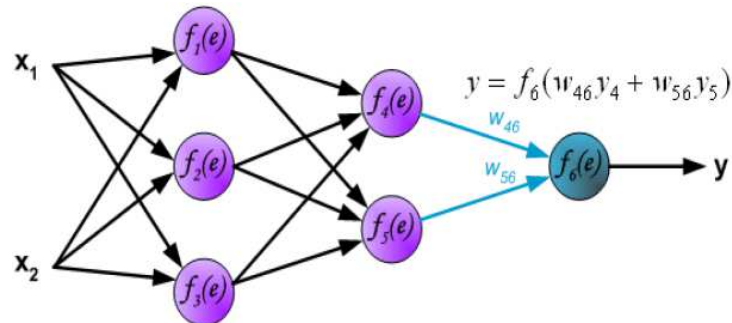


Figura 5. 5 Señal de salida

El siguiente paso del algoritmo consiste en comparar el valor de la señal de salida con el valor deseado. La diferencia entre ambas es conocida como la señal de error δ de la capa de salida (figura 5.6). El error se propaga en dirección contraria, es decir, atravesado todas las capas intermedias hasta alcanzar las neuronas de la capa de salida (figuras 5.7 y 5.8).

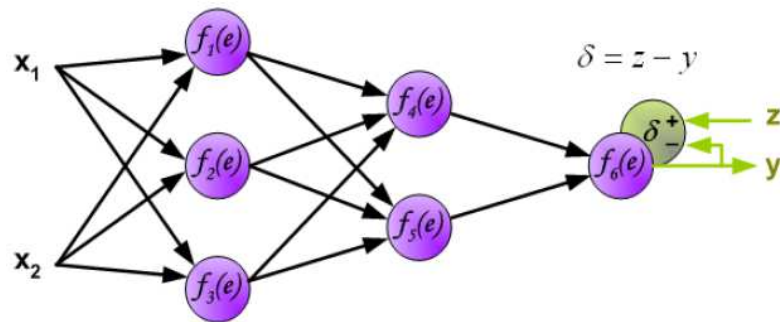


Figura 5. 6 Diferencia entre la salida obtenida y la salida deseada

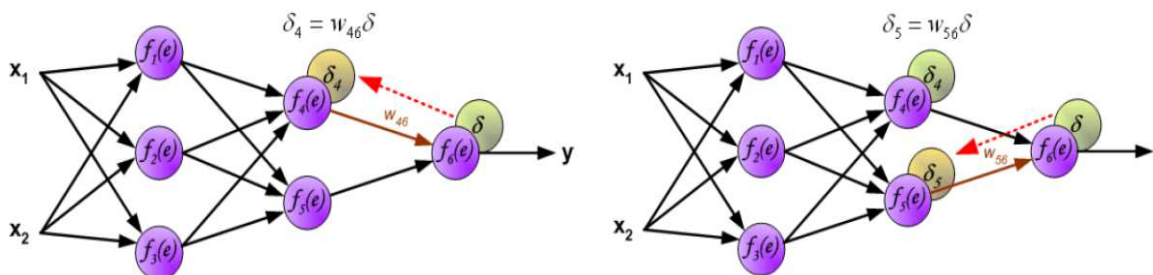


Figura 5. 7 Propagación del error en la capa intermedia

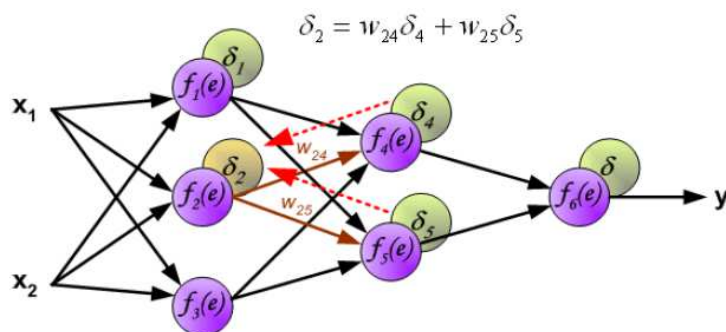


Figura 5. 8 Propagación del error en la primera capa de la red

Cuando la señal de error ha sido propagada por toda la red, los pesos son modificados según las figuras 5.9, 5.10 y 5.11, donde n es el factor de aprendizaje. Este proceso es iterativo hasta que la señal de salida obtenida sea la deseada.

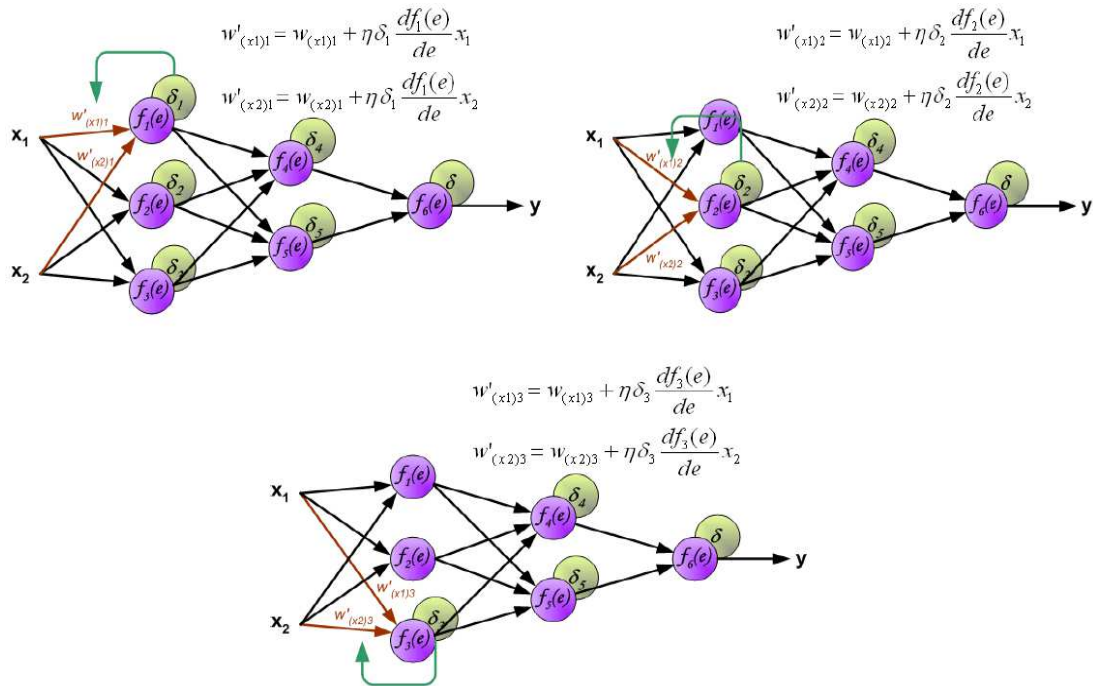


Figura 5. 9 Modificación de los pesos en la capa de entrada

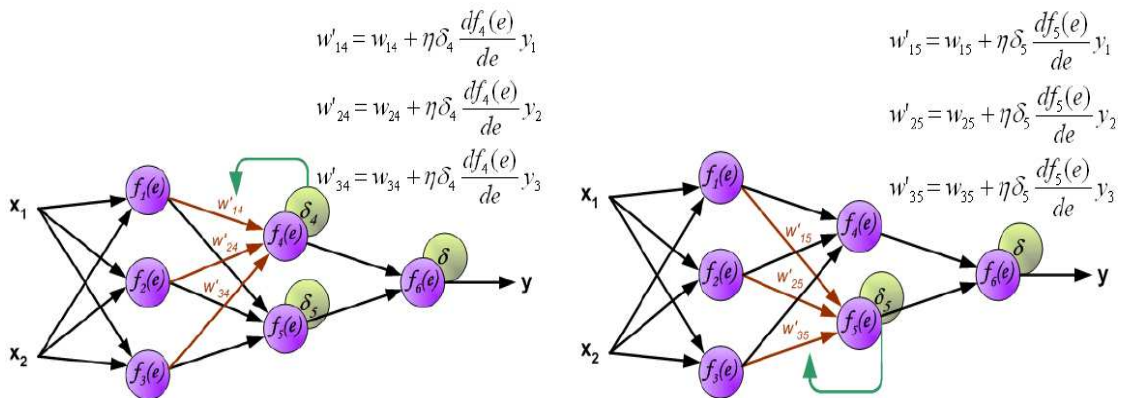


Figura 5. 10 Modificación de los pesos en la capa intermedia

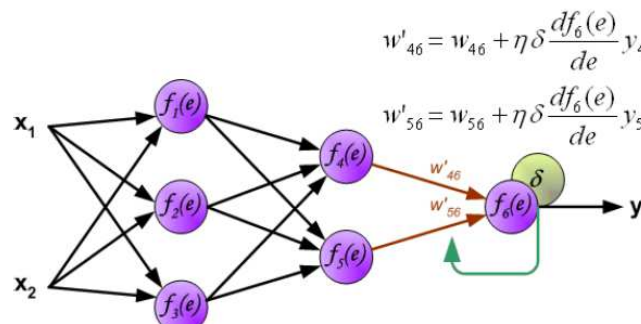


Figura 5. 11 Propagación del error hasta la capa de salida

CAPÍTULO 6: DATOS EXPERIMENTALES, ENTRENAMIENTO DE RED, VALIDACIÓN Y RESULTADOS

6.1 Datos experimentales

6.1.1 Introducción

Para la realización del proyecto ha sido necesario hacer una serie de ensayos previos con un amortiguador magneto-reológico en el laboratorio. Dicho amortiguador pertenece a la casa Audi y se monta en el modelo TT 2011.

Para poder hacer el ensayo fue necesario fabricar un cabezal especial, que enroscara al banco de ensayos y a la vez sujetara la base del amortiguador y una pequeña modificación en el amortiguador para alimentar con corriente el fluido magneto-reológico.

El banco de ensayos (figura 6.1) está formado por una torreta con un cilindro hidráulico (figura 6.2) conectado a un ordenador desde el que con un sencillo interfaz se controla el funcionamiento de la máquina, para ello hay una serie de sensores de fuerza, posición, etc. situados en la máquina que envían la información al ordenador donde se guarda para posteriormente tratarla y depurarla.



Figura 6. 1 Máquina de ensayos



Figura 6. 2 Cilindro hidráulico y sonda de fuerza

6.1.2 Desarrollo del ensayo

Todos los amortiguadores tienen una carrera determinada que varía de unos modelos a otros. Para su funcionamiento óptimo el amortiguador debe estar colocado en el banco de ensayo de tal manera que el vástago esté extendido la mitad de su carrera total, por lo que se ha que comprobar su carrera para localizar dicho punto y situarlo en el.

Para empezar se toma como posición “0” del ensayo el punto de montaje y se comprime lentamente el amortiguador hasta que se llega a un punto (P1) en el que sensor detecta un aumento brusco de la fuerza, lo cual indica que se está cerca de la pared inferior y por tanto del punto final de la carrera.

Para calcular la carrera hacia arriba se devuelve el embolo a la posición inicial “0”, y se repite la misma operación solo que esta vez levantando lentamente el embolo, traccionando el amortiguador, hasta la posición (P2) donde la fuerza nuevamente aumenta bruscamente.

Conocidos los puntos P1 y P2, la carrera del amortiguador queda definida como $P1+P2$ y el punto medio será $\frac{P1+P2}{2}$.

En nuestro caso los puntos obtenidos fueron $P1=-52,05$, al estar por debajo del punto “0”, y $P2=30.88$. Por tanto la carrera del amortiguador es 80 mm y el punto medio está situado en la posición -10, con respecto al punto “0” de montaje.

Conocido este dato se desplaza el embolo a la posición -10 y se le indica al programa que ese va ser el nuevo punto “0”.

El software de control de la máquina permite fijar la frecuencia, amplitud, tipo de señal, nº de ciclos, etc. a la que se quiere ensayar el amortiguador y a su vez recibe información de los sensores que posee el banco de ensayos. Dichos sensores hacen

posible almacenar en el ordenador información de los ensayos para conocer el comportamiento de dicho amortiguador.

Para los ensayos realizados se ha variado la frecuencia, la amplitud y la corriente acorde a los rangos enumerados en la tabla 6.1.

Tabla 6. 1 Rangos de amplitud, frecuencia y corriente

Amplitud (mm)	10	20	30			
Frecuencia (Hz)	1	2	3	4	5	6
Corriente (A)	0	0,5	1	1,5		

Para la variación de la corriente se ha empleado un potenciómetro conectado al amortiguador como el de la figura 6.3, para medir la corriente que le llegaba se ha usado un multímetro digital.



Figura 6. 3 Potenciómetro

Debido a que el comportamiento del amortiguador no solo varía con la corriente sino que también se ve afectado por la temperatura se ha usado una sonda laser de temperatura (figura 6.4) que indica en todo momento la temperatura de las paredes externas del amortiguador.



Figura 6. 4 Sonda laser de temperatura

En la figuras 6.5 y 6.7 se muestran las curvas experimentales del comportamiento del amortiguador a una frecuencia de 1 Hz para los distintos valores de corriente. En ambas figuras el eje x se corresponde con la fuerza.

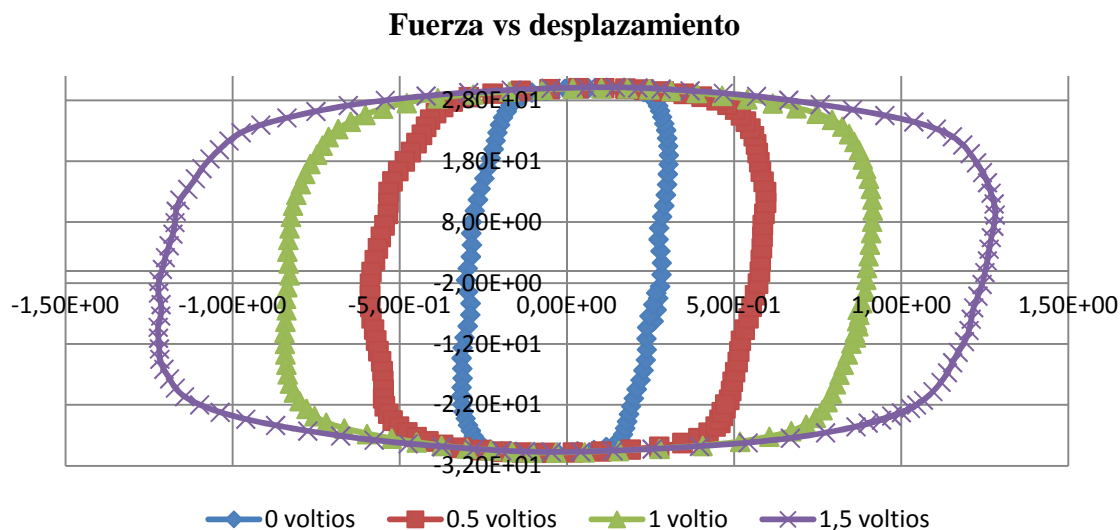


Figura 6. 5 Curva experimental amortiguador magneto-reológico fuerza vs desplazamiento

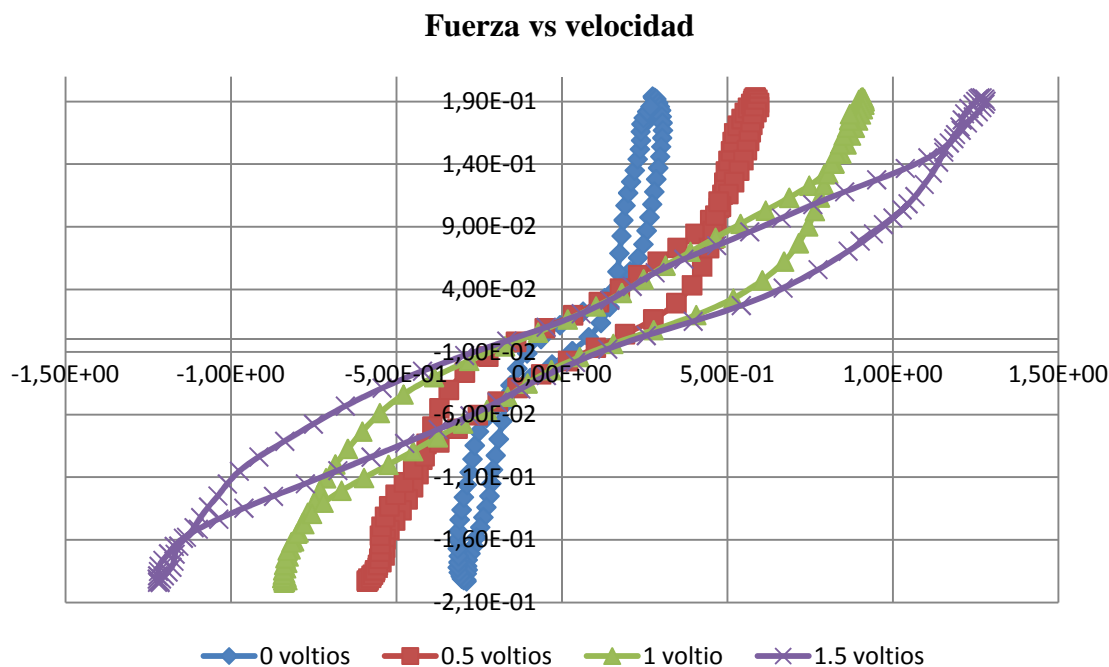


Figura 6. 6 Curva experimental amortiguador magneto-reológico fuerza vs velocidad

6.1.3 Resultados

Los datos obtenidos de los ensayos experimentales han de ser tratados y depurados.

Para el correcto aprendizaje de la red neuronal los valores de los datos de entrada y salida han de estar escalados entre -1 y 1. Para ello se han de normalizar los valores siguiendo las siguientes expresiones:

- Desplazamiento: $\Delta_i \text{ normalizado} = \frac{\Delta_i}{\Delta_{max}}$
- Velocidad: $v_i \text{ normalizado} = \frac{v_i}{v_{max}}$
- Frecuencia: $f_i \text{ normalizado} = \frac{f_i}{f_{max}}$
- Corriente: $v_i \text{ normalizado} = \frac{v_i}{v_{max}}$
- Fuerza: $F_i \text{ normalizado} = \frac{F_i}{F_{max}}$

6.2 Entrenamiento de la red

6.2.1 Introducción

La clave para obtener un buen entrenamiento es la tipología de la red elegida. A lo largo del proyecto se emplearán varias estructuras de red que se analizarán detenidamente.

La red neuronal propuesta consta de:

- Capa de entrada: En el problema analizado, esta capa estará formada por cuatro neuronas que corresponden con el desplazamiento, la velocidad, la frecuencia y la corriente.
- Capa oculta: El número de capas ocultas y de neuronas que debe haber en cada una de ellas se determinará durante el proceso de aprendizaje.
- Capa de salida: La capa de salida estará formada por una única neurona de salida que corresponderá con la fuerza del amortiguador.

Las distintas tipologías de red se han nombrado de la siguiente forma: *Red a_b_c*, donde *a* es el número de neuronas en la capa de entrada, *b* es el número de neuronas

de la capa oculta y c es el número de neuronas de la capa de salida. Las cuatro primeras estructuras de red que se han analizado durante el periodo de entrenamiento son las siguientes:

- Red 4_5_1 (Figura 6.7).

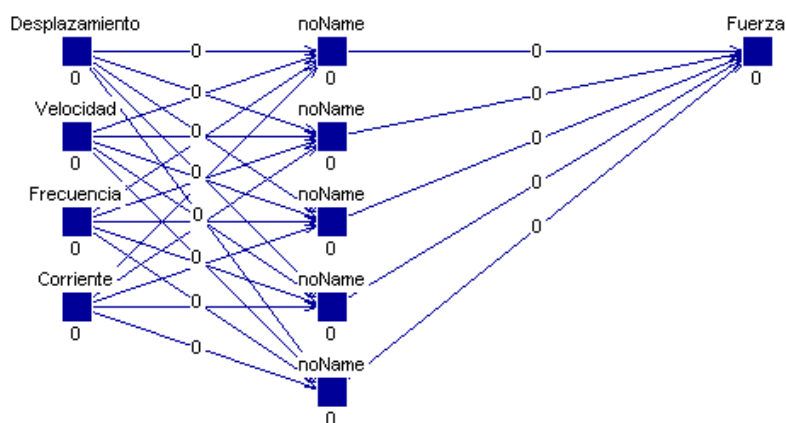


Figura 6. 7 Red 4_5_1

- Red 4_10_1 (Figura 6.8).

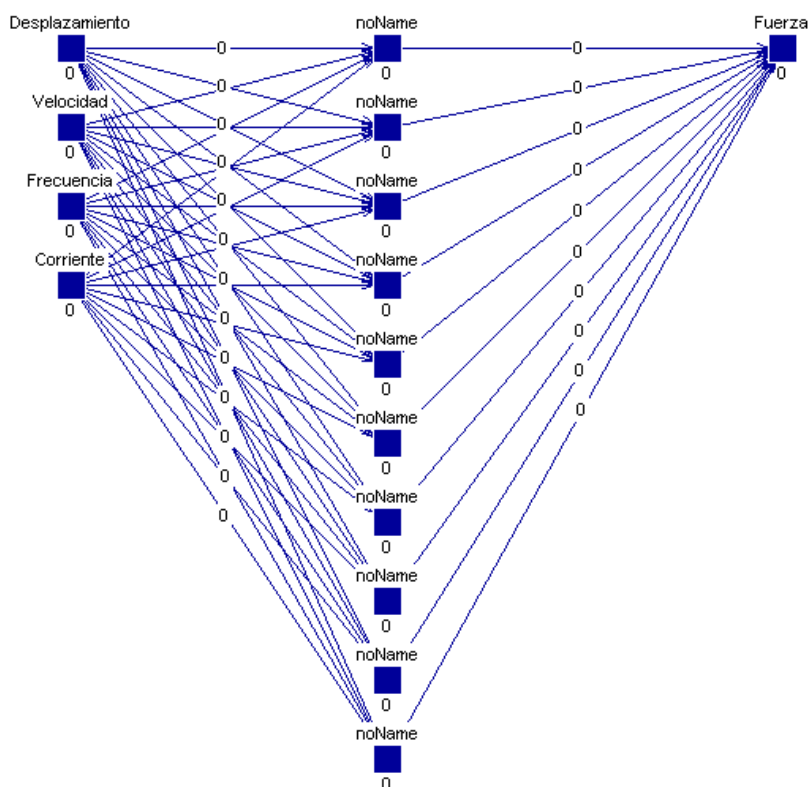


Figura 6. 8 Red 4_10_1

- Red 4_15_1 (Figura 6.9).

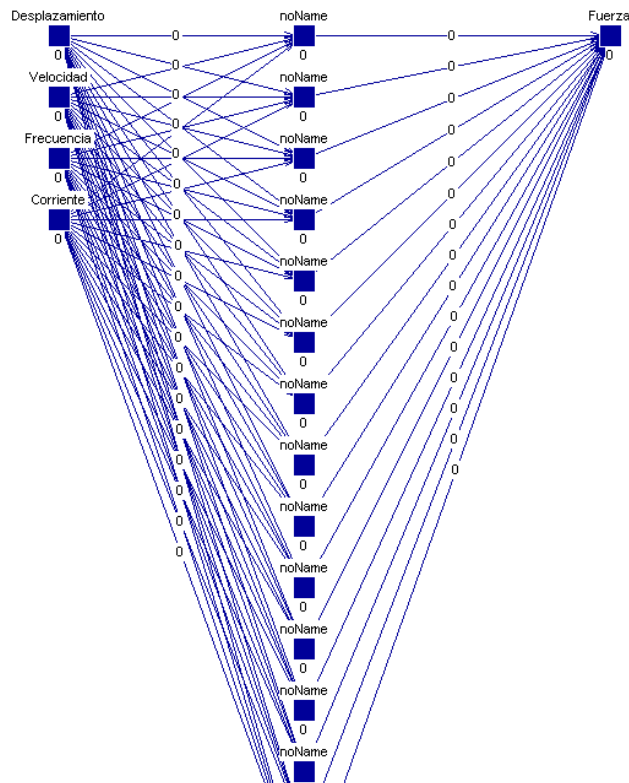


Figura 6. 9 Red 4_15_1

- Red 4_20_1 (Figura 6.10).

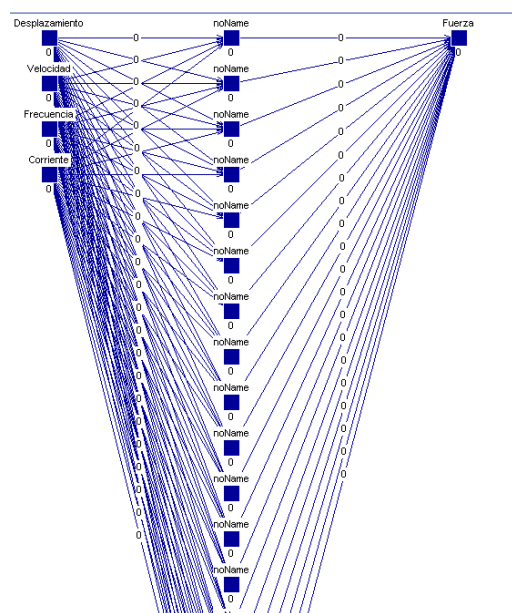


Figura 6. 10 Red 4_20_1

CAPÍTULO 6: DATOS EXPERIMENTALES, ENTRENAMIENTO DE RED, VALIDACIÓN Y RESULTADOS



Se trata de distintas tipologías de red, todas ellas caracterizadas por un número de entradas y salidas en común, cuatro y una, respectivamente. Además, todas las neuronas se encuentran conectadas entre sí. La diferencia entre las redes anteriores radica en el número de neuronas que componen la capa oculta o intermedia.

Una vez definida la tipología de red, se procede a su entrenamiento individual. El entrenamiento se lleva a cabo a través de los patrones de aprendizaje y validación seleccionados, previamente, de los datos experimentales.

SNNS pattern definition file v3.2 generated
at Mon Apr 25 18:03:29 1994

SNNS pattern definition file v3.2 generated
at Mon Apr 25 18:03:29 1994

No. of patterns : 1845
No. of input units : 4
No. of output units : 1

No. of patterns : 484
No. of input units : 4
No. of output units : 1

```
-0.273754 0.154867 0.166667 0.000000 0.128079
-0.211296 0.159292 0.166667 0.000000 0.132020
-0.148173 0.162832 0.166667 0.000000 0.134483
-0.084053 0.165487 0.166667 0.000000 0.137438
0.044518 0.169912 0.166667 0.000000 0.139901
0.108638 0.170796 0.166667 0.000000 0.137931
0.172425 0.171681 0.166667 0.000000 0.134975
0.234884 0.170796 0.166667 0.000000 0.135961
0.355482 0.167257 0.166667 0.000000 0.143350
0.415282 0.164602 0.166667 0.000000 0.145813
0.471761 0.161947 0.166667 0.000000 0.147783
0.528239 0.157522 0.166667 0.000000 0.148768
0.631229 0.147788 0.166667 0.000000 0.150246
0.681063 0.142478 0.166667 0.000000 0.149261
0.724252 0.136283 0.166667 0.000000 0.147783
0.767442 0.129204 0.166667 0.000000 0.146305
0.840532 0.113274 0.166667 0.000000 0.140394
0.873754 0.104425 0.166667 0.000000 0.137438
0.900332 0.095575 0.166667 0.000000 0.134483
0.923588 0.086372 0.166667 0.000000 0.130542
0.963455 0.067257 0.166667 0.000000 0.121182
0.976744 0.057788 0.166667 0.000000 0.113300
0.986711 0.048230 0.166667 0.000000 0.101478
0.993355 0.038761 0.166667 0.000000 0.086207
0.996678 0.019646 0.166667 0.000000 0.031576
0.993355 0.010177 0.166667 0.000000 -0.002798
```

```
-0.019734 0.168142 0.166667 0.000000 0.139409
0.296678 0.169912 0.166667 0.000000 0.140394
0.581395 0.153097 0.166667 0.000000 0.149754
0.803987 0.121239 0.166667 0.000000 0.143350
0.946844 0.076903 0.166667 0.000000 0.126108
0.996678 0.029115 0.166667 0.000000 0.063547
0.953488 -0.020619 0.166667 0.000000 -0.066502
0.797342 -0.081947 0.166667 0.000000 -0.098522
0.561462 -0.125664 0.166667 0.000000 -0.116749
0.267442 -0.155752 0.166667 0.000000 -0.139901
-0.049502 -0.169027 0.166667 0.000000 -0.148768
-0.362126 -0.167257 0.166667 0.000000 -0.150739
-0.634551 -0.147788 0.166667 0.000000 -0.155172
-0.840532 -0.111504 0.166667 0.000000 -0.145813
-0.960133 -0.065133 0.166667 0.000000 -0.123645
-0.990033 -0.017611 0.166667 0.000000 -0.014532
-0.916944 0.035133 0.166667 0.000000 0.078325
-0.737542 0.094690 0.166667 0.000000 0.094581
-0.485050 0.134513 0.166667 0.000000 0.116256
-0.183056 0.161062 0.166667 0.000000 0.127094
-0.132778 0.327125 0.333333 0.000000 0.212807
0.187833 0.343424 0.333333 0.000000 0.210665
0.488379 0.322562 0.333333 0.000000 0.218567
0.739371 0.271204 0.333333 0.000000 0.197577
0.910826 0.186964 0.333333 0.000000 0.159086
0.989278 0.087138 0.333333 0.000000 0.102317
```

a)

b)

Figura 6. 11 Patrón de cuatro entradas y una salida: a) Entrenamiento, b) Validación

La figura 6.11 se corresponde con el formato utilizado para cargar los patrones de aprendizaje en el programa JavaNNS. En ella se observa un conjunto de patrones para el entrenamiento y para la validación con cuatro entradas que corresponden con el desplazamiento, la velocidad, la frecuencia y la corriente y una salida que se corresponde con la fuerza del amortiguador.

Para el proceso de aprendizaje y posterior validación de la red se utilizan una serie de datos elegidos al azar de los disponibles. Además, para garantizar un correcto aprendizaje de la red neuronal es necesario que dichos datos de validación cubran completamente las curvas descritas. La serie de datos está compuesta por 2329 grupos de valores de entre los cuales se seleccionan 1845 para el entrenamiento de la red y 484 para su validación.

En la figura 6.12 se representan gráficamente los datos utilizados para el aprendizaje y los datos empleados para la validación, para una fracción del total de datos, usando la fuerza del amortiguador correspondientes a cada muestra para hacerse una idea de cómo se han escogido los datos para que cubran la curva descrita.

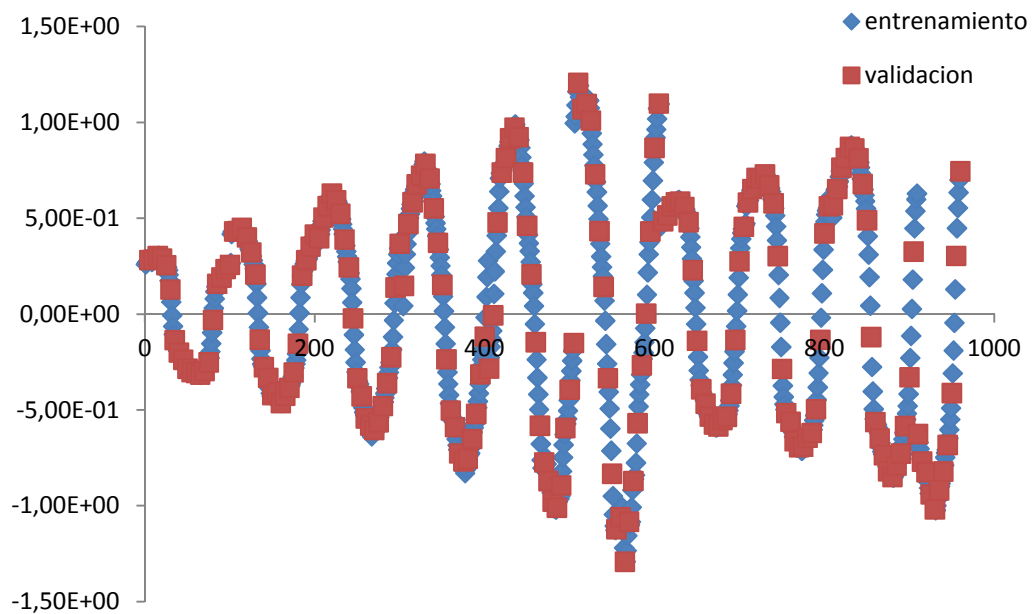


Figura 6. 12 Representación de una porción de los datos totales usados para entrenar y validar

Además de la tipología hay que definir los factores de aprendizaje que se emplean en el entrenamiento de la red y justificar el porqué de su elección.

6.2.2 Función de activación

Para la capa de entrada y las capas ocultas, se utiliza como función de activación la función sigmoideal. La elección de dicha función se debe a que presenta una buena respuesta en las redes que utilizan el algoritmo de retropropagación. La función sigmoideal presenta dos variables: la función tangente hiperbólica y la función logística, ambas con características similares. Se decide utilizar la primera de ellas, porque el rango de salida se encuentra entre -1 y 1, mientras que la función logística sólo produce salidas positivas. De esta manera, no se limita el comportamiento de las neuronas.

En la capa de salida, se utiliza como función de activación la función lineal.

6.2.3 Factor de aprendizaje

El factor o tasa de aprendizaje es el elemento encargado del entrenamiento de red y la importancia reside en su correcta elección para proporcionar resultados favorables. Si el factor es un valor alto, el error disminuye a gran velocidad, necesitando menos tiempo para alcanzar un valor de error aceptable. El problema radica en que el error final obtenido es mayor que el alcanzado con una tasa de aprendizaje más pequeña, siendo esta última más lenta durante el aprendizaje.

La figura 6.13 representa la evolución del error dependiendo de la tasa de aprendizaje usado.

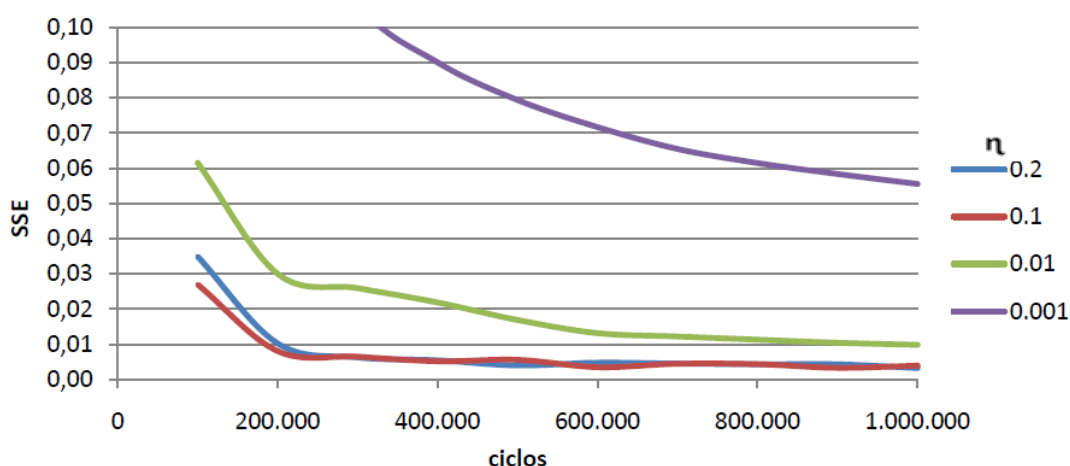


Figura 6. 13 Evolución de error SSE frente a distintos factores de aprendizaje

Para el entrenamiento se comenzará con un factor de aprendizaje alto, y se mantendrá constante mientras el error siga descendiendo. Cuando alcanza un valor tal que no se consiga reducir más dicho error, se disminuirá el factor de aprendizaje procediendo de la misma forma, hasta que se alcance el valor de error final.

6.2.4 Error de entrenamiento

Para saber la precisión de los resultados proporcionados por la red neuronal, se recurre a una función que calcula el error existente entre la salida proporcionada por la red y la salida que debería proporcionar. Algunas medidas estándar del error son:

- La suma de los cuadrados de los errores (*Sum of Square Errors, SSE*) definida como:

$$SSE = \sum_P \sum_i (Y_{Pi} - \hat{Y}_{Pi})^2 \quad (6.1)$$

donde:

p pertenece al conjunto de patrones.

i es el número de neuronas en la capa de salida.

\hat{Y}_p es la salida proporcionada por la red ante la presentación del patrón de entrada Y_p .

- El error cuadrático medio (*Mean Square Error, MSE*) definido como:

$$MSE = \frac{\sum_P \sum_i (Y_{Pi} - \hat{Y}_{Pi})^2}{r} = \frac{SSE}{r} \quad (6.2)$$

donde r es el número de patrones utilizados en el aprendizaje.

- La raíz cuadrada del error cuadrático medio (*Root Mean Square Error, RMSE*) definida como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_P \sum_i (Y_{Pi} - \hat{Y}_{Pi})^2}{r}} = \sqrt{MSE} \quad (6.3)$$

Como la salida de la red depende de forma directa del valor de los pesos en un determinado instante, se puede afirmar que el error cometido es función de los pesos de la red. El algoritmo de aprendizaje tratará de buscar un conjunto de pesos que minimice dicho error.

6.2.5 Error de validación

A la hora de seleccionar la tipología de red que aprende mejor hay que tener en cuenta varios tipos de error que se explican a continuación.

En el apartado anterior se ha definido el error SSE y la información que éste proporciona. El programa ofrece dos tipos de error: SSE de entrenamiento y SSE de validación.

El error SSE de entrenamiento indica el error final alcanzado por todos los patrones que son utilizados durante el proceso de entrenamiento de red; mientras que el error SSE de validación define el error obtenido utilizando los patrones de validación sin propagar dichos valores en la red, es decir, manteniendo los pesos en las neuronas que fueron alcanzados con anterioridad durante el periodo de aprendizaje.

6.2.6 Entrenamiento

Las redes 4_5_1, 4_10_1, 4_15_1, 4_20_1, 4_25_1, 4_30_1, 4_35_1 y 4_40_1 se entrenarán para poder seleccionar cuál de ellas aprende de forma más favorable. Para ello se irá disminuyendo la tasa de aprendizaje a medida que aumenta el número de ciclos hasta alcanzar el error final.

6.2.6.1 Red 4_5_1

Los resultados obtenidos durante el entrenamiento de la fuerza para la red 4_5_1 son los indicados en la tabla 6.3.

RED 4_5_1			
η	Nº Ciclos	MSE	
		Inicial KN	Final KN
0,2	1000	0.061531	0.039762
0,1	2000	0.039762	0.030448
0,01	2000	0.030448	0.024852
0,001	3000	0.024852	0.024070

Tabla 6. 2 Resultados entrenamiento red4_5_1

La tabla 6.3 recoge los resultados del entrenamiento para una red de cinco neuronas en la capa intermedia. El estudio comienza usando un factor de entrenamiento de 0.2; se trata de un valor alto, por lo tanto, el error descendió considerablemente desde un valor inicial de 0.061531 kN hasta un error final de 0.039762 kN después de mil ciclos, punto a partir del cual no se seguía produciendo descenso de error. Por ello se varió el factor aprendizaje a un valor de 0.1. El resultado obtenido es de nuevo un descenso considerable del error MSE hasta alcanzar un valor de 0.030448 kN después de dos mil ciclos. De nuevo se procedió a disminuir la tasa de aprendizaje, hasta un valor de 0,01 alcanzando un error de 0.024852 kN después de dos mil ciclos. Finalmente, se entrenó la red con un factor de aprendizaje de 0,001 a partir del cual el error apenas disminuía. Por lo tanto, el valor de error de SSE es de 0.024070 kN.

El programa JavaNNS proporciona una herramienta gráfica para representar la evolución del error. A diferencia del SNNS este programa es capaz de representar un número elevado de ciclos.

La figura 6.14 representa el error de la red 4_5_1 durante el entrenamiento de la fuerza en función del número de ciclos de aprendizaje. En ella, se observa las oscilaciones que experimenta el error a lo largo de los ciclos dependiendo del factor de entrenamiento. Las oscilaciones correspondientes a los factores de aprendizaje más altos son a la vez más pronunciadas, mientras que utilizando tasas de aprendizaje más bajas, se logra estabilizar el error. Esto es debido a que la variación

de pesos en la red entre un ciclo y el siguiente es menos pronunciada para factores de aprendizaje bajos.

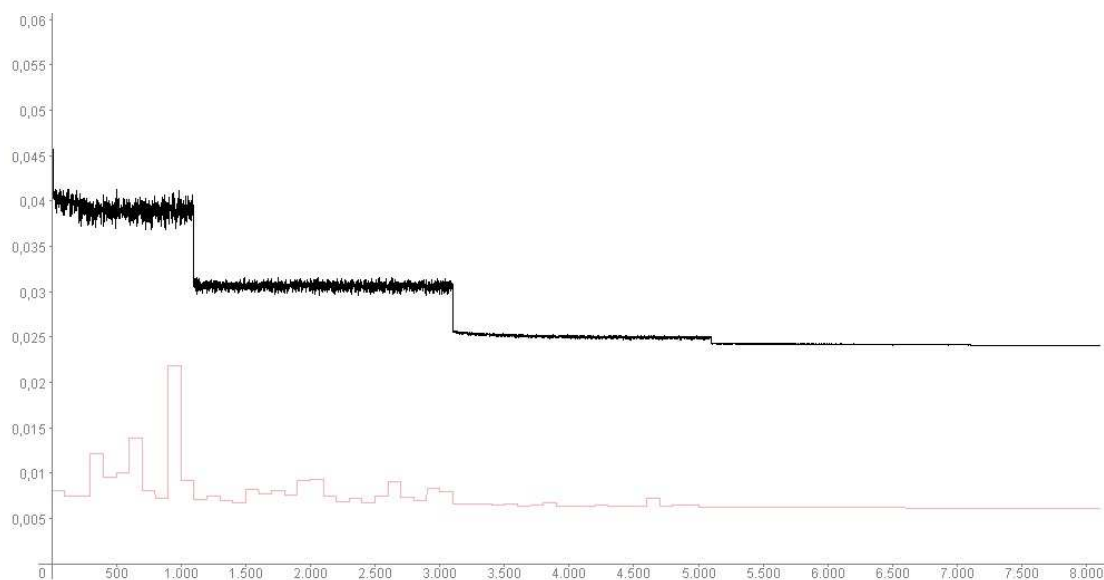


Figura 6. 14 Errores red4_5_1

6.2.6.2 Red 4_10_1

Los resultados del entrenamiento de la red 4_10_1 para el análisis de la fuerza son los recogidos en la tabla 6.4.

RED 4_10_1			
η	Nº Ciclos	MSE	
		Inicial KN	Final KN
0,2	1000	0.049154	0.19217
0,1	1000	0.19217	0.17341
0,01	1000	0.17341	0.11795
0,001	2000	0.11795	0.09575

Tabla 6. 3 Resultados entrenamiento red4_10_1

El entrenamiento comienza con un error inicial de 0.049154 kN descendiendo hasta 0.19217 kN después de ser entrenada durante mil ciclos con un factor de aprendizaje de 0.2. Posteriormente y a medida que van avanzando los ciclos y disminuyendo el factor de aprendizaje se obtiene un valor final de 0.09575 kN después de de cinco mil ciclos.

En la figura 6.15 se ha representando gráficamente la evolución del error, para una red con diez neuronas en la capa oculta, y para distintos factores de aprendizaje.

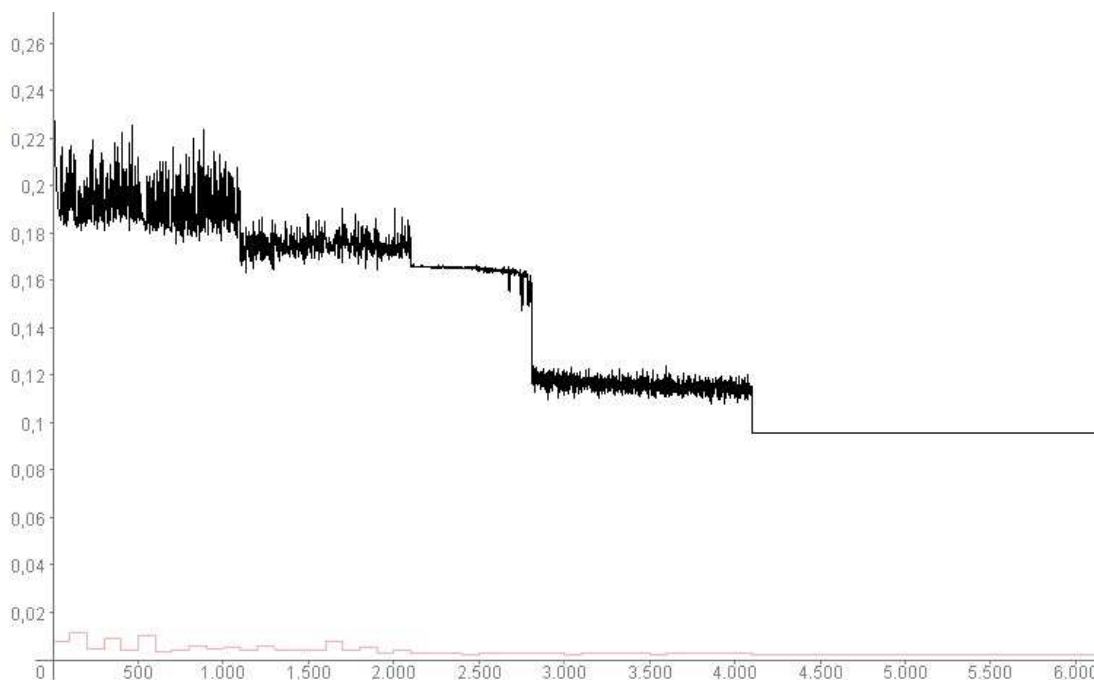


Figura 6. 15 Errores red4_10_1

6.2.6.3 Red 4_15_1

Los resultados del entrenamiento de la red 4_15_1 para el análisis de la fuerza son los recogidos en la tabla 6.5.

RED 4_15_1			
η	Nº Ciclos	MSE	
		Inicial KN	Final KN
0,2	1000	0.07815	0.01837
0,1	1000	0.01837	0.01117
0,01	1000	0.01117	0.01091
0,001	2000	0.01091	0.00775

Tabla 6. 4 Error entrenamiento red 4_15_1

El entrenamiento comienza con un error inicial de 0.07815 kN descendiendo hasta 0.01837 kN después de ser entrenada durante mil ciclos con un factor de aprendizaje de 0.2. Posteriormente y a medida que van avanzando los ciclos y disminuyendo el factor de aprendizaje se obtiene un valor final de 0.00775 kN después de de cinco mil ciclos.

En la figura 6.16 se ha representando gráficamente la evolución del error, para una red con quince neuronas en la capa oculta, y para distintos factores de aprendizaje.

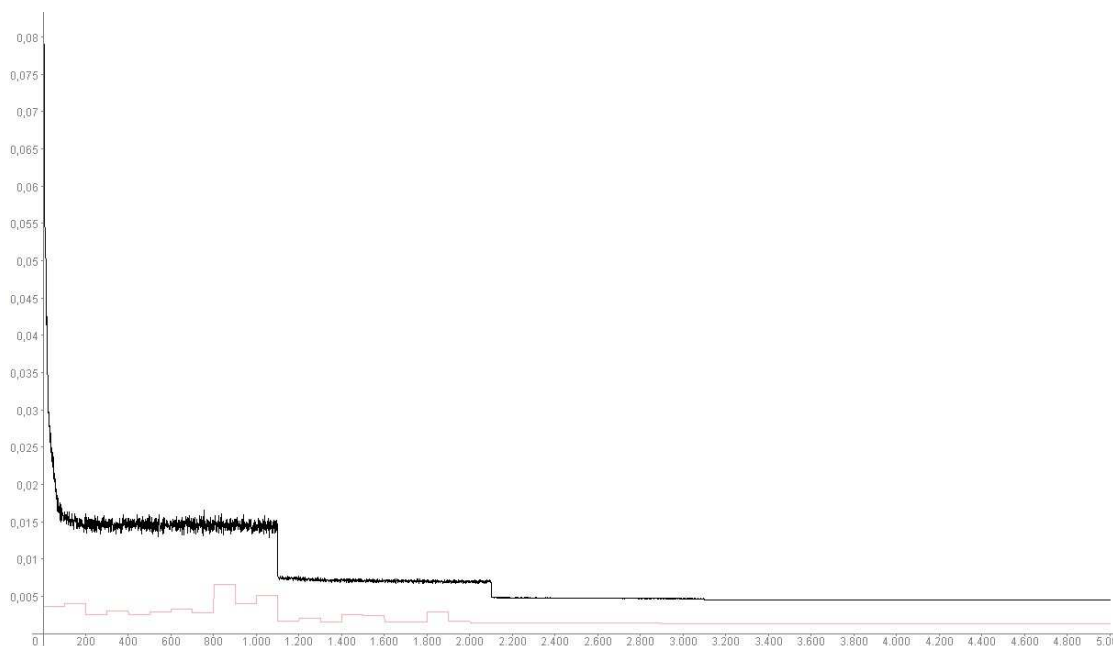


Figura 6. 16 Errores red4_15_1

6.2.6.4 Red 4_20_1

Los resultados del entrenamiento de la red 4_20_1 para el análisis de la fuerza son los recogidos en la tabla 6.6.

RED 4_20_1			
η	Nº Ciclos	MSE	
		Inicial KN	Final KN
0,2	1000	0.08451	0.01581
0,1	1000	0.01581	0.00754
0,01	1000	0.00754	0.00508
0,001	2000	0.00508	0.00492

Tabla 6. 5 Error entrenamiento red4_20_1

El entrenamiento comienza con un error inicial de 0.08451 kN descendiendo hasta 0.01581 kN después de ser entrenada durante mil ciclos con un factor de aprendizaje de 0.2. Posteriormente y a medida que van avanzando los ciclos y disminuyendo el factor de aprendizaje se obtiene un valor final de 0.00492 kN después de cinco mil ciclos.

En la figura 6.17 se ha representando gráficamente la evolución del error, para una red con veinte neuronas en la capa oculta, y para distintos factores de aprendizaje.

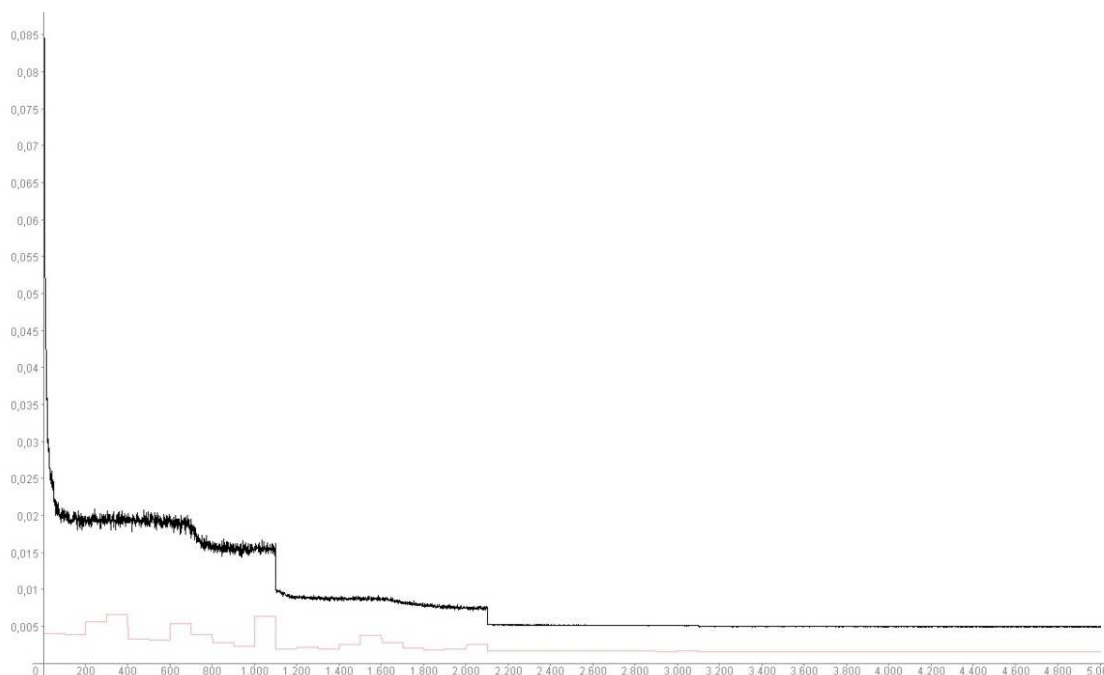


Figura 6. 17 Errores red4_20_1

6.2.6.5 Red 4_25_1

Los resultados del entrenamiento de la red 4_25_1 para el análisis de la fuerza son los recogidos en la tabla 6.7.

RED 4_25_1			
η	Nº Ciclos	MSE	
		Inicial KN	Final KN
0,2	1000	0.08942	0.01485
0,1	1000	0.01485	0.00950
0,01	1000	0.00950	0.00692
0,001	2000	0.00692	0.00669

Tabla 6. 6 Error entrenamiento red4_25_1

El entrenamiento comienza con un error inicial de 0.08942 kN descendiendo hasta 0.01485 kN después de ser entrenada durante mil ciclos con un factor de aprendizaje de 0.2. Posteriormente y a medida que van avanzando los ciclos y disminuyendo el factor de aprendizaje se obtiene un valor final de 0.00669 kN después de cinco mil ciclos.

En la figura 6.18 se ha representando gráficamente la evolución del error, para una red con veinticinco neuronas en la capa oculta, y para distintos factores de aprendizaje.

CAPÍTULO 6: DATOS EXPERIMENTALES, ENTRENAMIENTO DE RED, VALIDACIÓN Y RESULTADOS

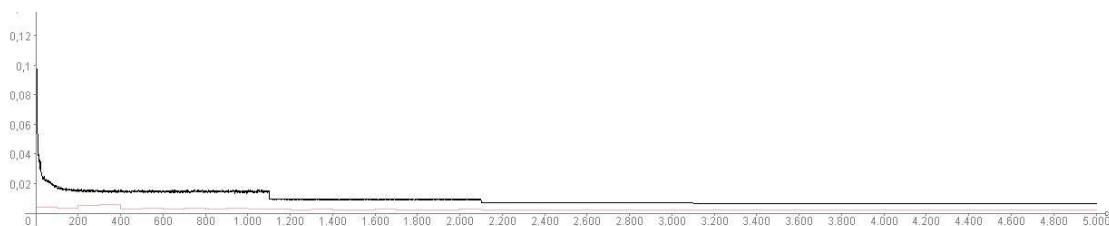


Figura 6. 18 Errores red4_25_1

6.2.6.6 Red 4_30_1

Los resultados del entrenamiento de la red 4_30_1 para el análisis de la fuerza son los recogidos en la tabla 6.8.

RED 4_30_1			
η	Nº Ciclos	MSE	
		Inicial KN	Final KN
0,2	1000	0.10824	0.01287
0,1	1000	0.01287	0.00806
0,01	1000	0.00806	0.00610
0,001	2000	0.00610	0.00590

Tabla 6. 7 Error entrenamiento red4_30_1

El entrenamiento comienza con un error inicial de 0.10824 kN descendiendo hasta 0.01287 kN después de ser entrenada durante mil ciclos con un factor de aprendizaje de 0.2. Posteriormente y a medida que van avanzando los ciclos y disminuyendo el factor de aprendizaje se obtiene un valor final de 0.00590 kN después de cinco mil ciclos.

En la figura 6.19 se ha representando gráficamente la evolución del error, para una red con treinta neuronas en la capa oculta, y para distintos factores de aprendizaje.

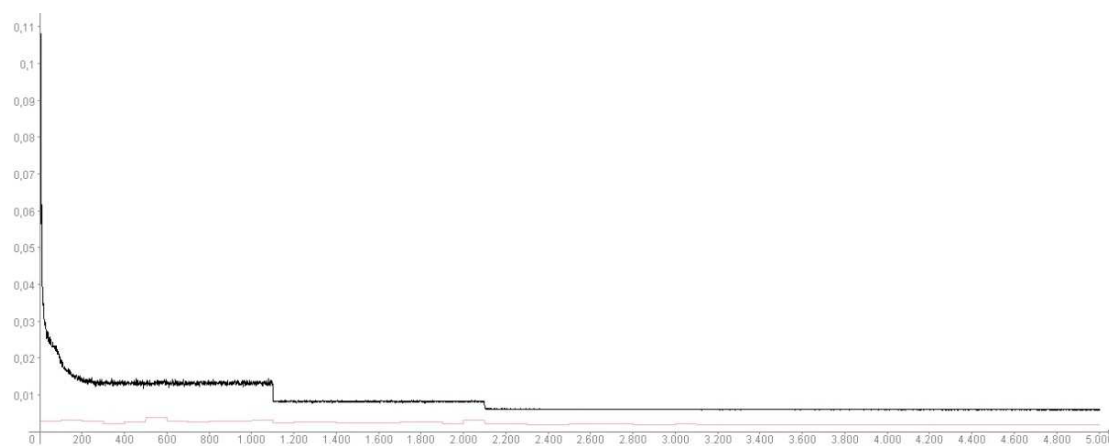


Figura 6. 19 Errores red4_30_1

6.2.6.7 Red 4_35_1

Los resultados del entrenamiento de la red 4_35_1 para el análisis de la fuerza son los recogidos en la tabla 6.9.

RED 4_35_1			
η	Nº Ciclos	MSE	
		Inicial KN	Final KN
0,2	1000	0.12736	0.01573
0,1	1000	0.01573	0.00754
0,01	1000	0.00754	0.00508
0,001	2000	0.00508	0.00494

Tabla 6. 8 Error entrenamiento red4_35_1

El entrenamiento comienza con un error inicial de 0.12736 kN descendiendo hasta 0.01573 kN después de ser entrenada durante mil ciclos con un factor de aprendizaje de 0.2. Posteriormente y a medida que van avanzando los ciclos y disminuyendo el factor de aprendizaje se obtiene un valor final de 0.00494 kN después de cinco mil ciclos.

En la figura 6.20 se ha representando gráficamente la evolución del error, para una red con treinta y cinco neuronas en la capa oculta, y para distintos factores de aprendizaje.

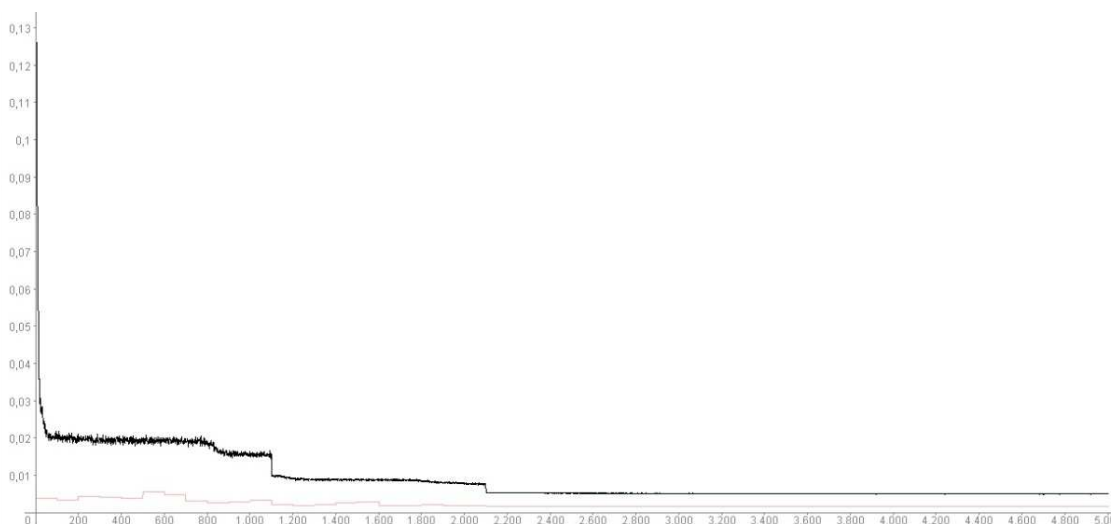


Figura 6. 20 Errores red4_35_1

6.2.6.8 Red 4_40_1

Los resultados del entrenamiento de la red 4_40_1 para el análisis de la fuerza son los recogidos en la tabla 6.10.

CAPÍTULO 6: DATOS EXPERIMENTALES, ENTRENAMIENTO DE RED, VALIDACIÓN Y RESULTADOS



RED 4_40_1			
η	Nº Ciclos	MSE	
		Inicial KN	Final KN
0,2	1000	0.12132	0.01520
0,1	1000	0.01520	0.00788
0,01	1000	0.00788	0.00526
0,001	2000	0.00526	0.00502

Tabla 6. 9 Error entrenamiento red4_40_1

El entrenamiento comienza con un error inicial de 0.12132 kN descendiendo hasta 0.01520 kN después de ser entrenada durante mil ciclos con un factor de aprendizaje de 0.2. Posteriormente y a medida que van avanzando los ciclos y disminuyendo el factor de aprendizaje se obtiene un valor final de 0.00502 kN después de cinco mil ciclos.

En la figura 6.21 se ha representando gráficamente la evolución del error, para una red con cuarenta neuronas en la capa oculta, y para distintos factores de aprendizaje.

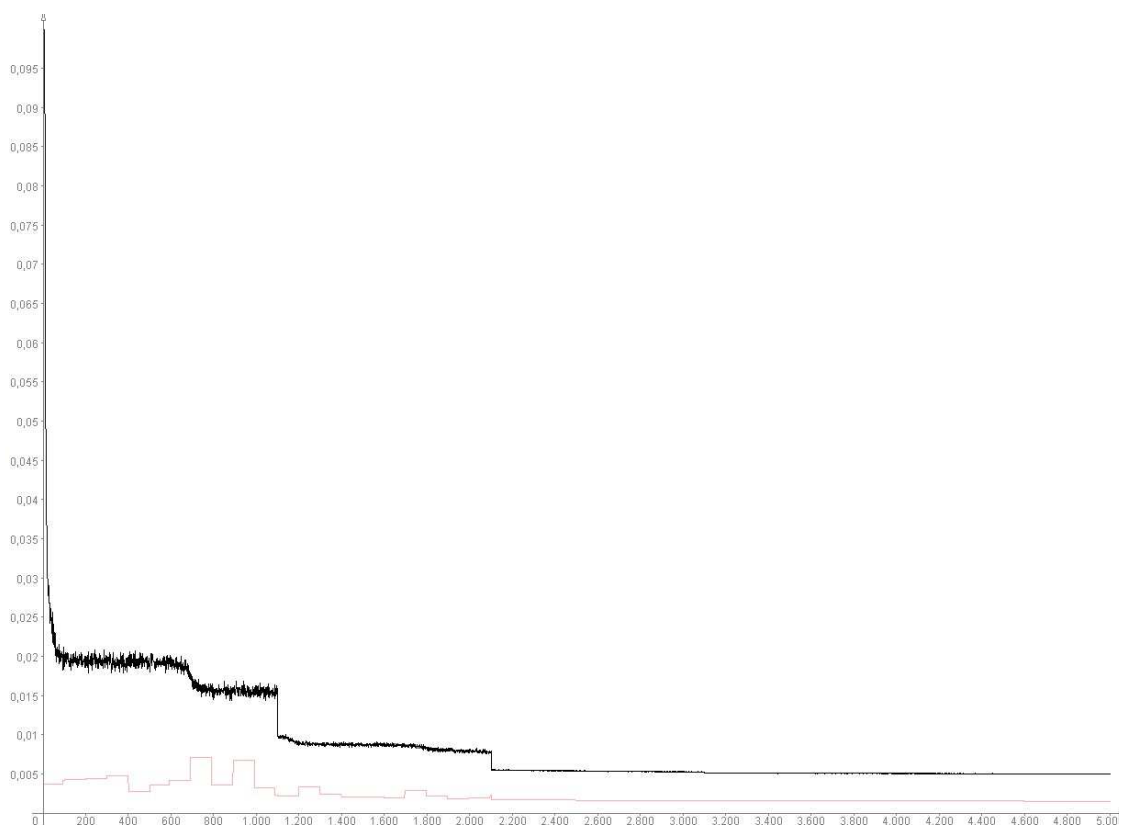


Figura 6. 21 Errores red4_40_1

6.3 Validación del modelo

Los resultados de las redes entrenadas se exponen y analizan en este apartado. Para ello, se propagan los datos preseleccionados como datos de validación obteniendo el error para las redes entrenadas.

6.3.1. Datos de validación para la fuerza

Los resultados obtenidos en el proceso de entrenamiento para la fuerza del amortiguador se resumen en la tabla 6.11; en ella se observa el error MSE alcanzando durante el aprendizaje y el error de validación para las diferentes tipologías de red estudiadas.

ERROR	RED							
	4_5_1	4_10_1	4_15_1	4_20_1	4_25_1	4_30_1	4_35_1	4_40_1
MSE Aprendizaje	0.024070	0.09575	0.00775	0.00492	0.00669	0.00590	0.00494	0.00502
MSE Validación	0.006136	0.002391	0.002357	0.001588	0.002011	0.001938	0.001582	0.001518

Tabla 6. 10 Errores de entrenamiento y validación para las distintas red

Las redes que han aprendido de forma más favorable son las formada por veinte y treinta y cinco neuronas en la capa oculta, debido a que, tanto los errores MSE obtenidos durante la fase de entrenamiento como los errores obtenidos en la fase de validación son menores que con las demás tipologías de red.

Nos quedaremos con la red4_20_1 al ser menos compleja y la diferencia de precisión con respecto a la red4_35_1 mínima.

Para proceder a la validación del modelo de red, se emplea la red 4_20_1 entrenada, es decir, manteniendo la misma distribución de pesos que se alcanzó en el proceso de aprendizaje, y se propaga los patrones de validación. A través de la herramienta “*save data*” (ver Anexo A), se genera un archivo en formato txt donde se puede ver la diferencia entre las salidas deseadas y las salidas reales que ofrece la red, o dicho de otra forma, el error para cada uno de los patrones. El valor de la salida real y la salida deseada se puede observar en la figura 6.22 y la diferencia entre ambas lo podemos ver en la figura 6.23.

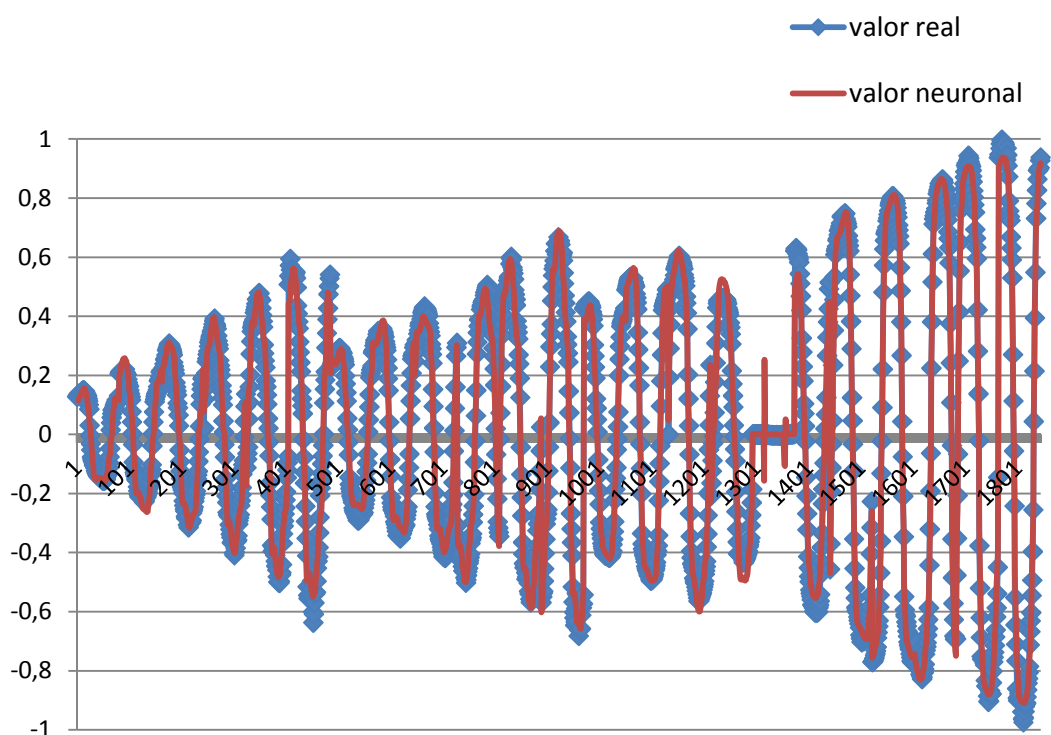


Figura 6. 22 Diferencia entre la salida real y la deseada

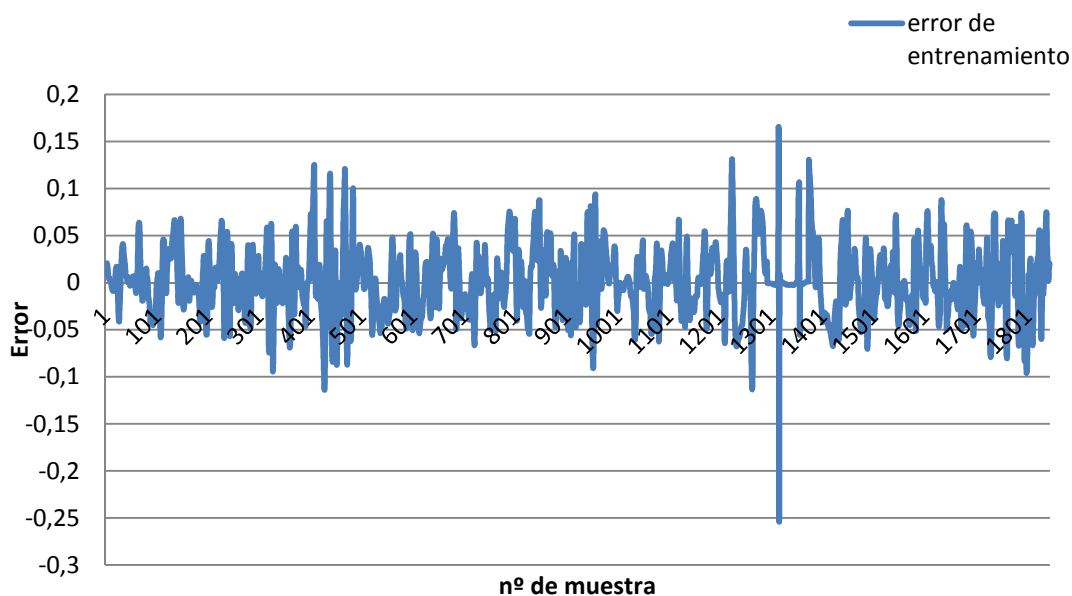


Figura 6. 23 Error de entrenamiento

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

7.1 Conclusiones

En el presente Proyecto Fin de Carrera se han entrenado distintas redes neuronales artificiales con la finalidad de encontrar un modelo no paramétrico que predijese los esfuerzos que aparecen en un amortiguador magneto-reológicos en función de la frecuencia, la velocidad, el desplazamiento y la corriente.

Para ello, se entrenaron diferentes tipologías de redes con 1845 patrones de aprendizaje, formados por parejas de entrada-salida. La validación se produjo con 484 patrones de validación. Ambos grupos de datos provienen de una serie de ensayos realizados previamente. Los datos experimentales utilizados corresponden a un amortiguador magneto-reológicos procedente de un audi TT.

El programa empleado para la creación, entrenamiento y validación de las redes neuronales artificiales es JAVANNS.

Debido a la respuesta que ofrecían las redes neuronales durante el proceso de aprendizaje con los valores primitivos, se optó por normalizar el valor de los patrones para que estuvieran comprendidos entre -1 y 1.

Para el aprendizaje de las redes neuronales se tuvieron que definir distintos parámetros de entrenamiento:

- Tipología de red (número de capas y de neuronas).
- Algoritmo de aprendizaje (*Backpropagation*).
- Activación de la opción shuffle (debido al elevado número de datos)
- Función de activación de neuronas (función tangente hiperbólica).
- Duración del aprendizaje (Nº de ciclos).
- Factor o tasa de aprendizaje.

El óptimo aprendizaje de las redes neuronales está relacionado con la correcta selección de los parámetros anteriores. Para cada uno de los casos analizados se han añadido tablas describiendo dichos factores. Además se han introducido figuras donde se representa la evolución del error de entrenamiento y validación y en la red4_20_1 figuras donde se representan las salidas que el programa ofrece y las deseadas.

Atendiendo a los resultados, se puede afirmar que es posible alcanzar una relación entre el desplazamiento, la velocidad, la frecuencia y la corriente con el esfuerzo,

mediante redes neuronales artificiales formadas por: una red de tres capas, con veinte neuronas en la capa intermedia, función de activación tangente hiperbólica y función de salida identidad. Esta red ofrece errores inferiores al 4 %.

7.2 Trabajos futuros

En el análisis de la dinámica vehicular, aparecen numerosos parámetros que intervienen en la generación de esfuerzos en el amortiguador. En el presente proyecto fin de carrera únicamente se ha considerado la fuerza del amortiguador en estático con ciclos repetitivos. Por lo tanto se propone realizar un análisis similar estudiando el comportamiento de dicho amortiguador colocado en un vehículo ensayado en carretera.

La sonda de temperatura se ha empleado como referencia para realizar los ensayos a un rango de temperaturas constante, en las paredes exteriores del amortiguador, sin ser tenida en cuenta a la hora de entrenar la red. Dado que las propiedades del fluido magneto-reológicos se ven modificadas con la temperatura sería muy recomendable hacer un estudio en el que la temperatura interna del fluido fuera una variable más al igual que la frecuencia o la corriente.

Referencias bibliográficas

- [1] Tipos de suspensión.
<http://www.fullextreme.com.mx/index.php/component/content/article/1-latest-news/57-suspension>
- [2] LUQUE, Pablo. “Ingeniería del automóvil: sistemas y comportamiento dinámico”, Thomson, España, 2004. Primera edición
- [3] Varios Autores. “Manual CEAC del Automóvil”, Editorial Ceac, 2002.
- [4] Cursos de mecánica. Suspensión.
http://www.mecanicavirtual.org/indice_cursos.html
- [5] Varios Autores, “Mecánica del Automóvil”, colección GTZ.
- [6] Echevarría García Carlos, PFC de mejora de la suspensión del vehículo Car-Cross, Escuela Superior de ingenieros de San Sebastián, 2003.
www.tecnun.es/automocion/proyectos/hardware_suspension/memoria.pdf
- [7] Manuales de automoción, Juan Alberdi Urbieto, campus tecnológico de la universidad de navarra.
- [8] *Seguridad Activa*, Tráfico, Septiembre-Octubre 2001.
- [9] “*Amortiguadores y suspensión*”. Manuales de automoción. Juan Alberdi Urdieta. Universidad de Navarra. Enero 2003.
- [10] Web Monografías, trabajo acerca de los tipos de amortiguadores:
<http://monografias.com/trabajos22/sistema-suspension/sistema-suspension.shtml>
- [11] Oviedo Gutiérrez Diego, PFC de optimización del modelo bouc-wen de un amortiguador magneto_reológico mediante algoritmos genéticos, Universidad Carlos III de Madrid, 2010.
- [12] Guzmán Mayorga César Patricio, PFC de diseño y construcción de un prototipo de amortiguador magneto_reológico, Universidad politécnica salesiana, 2007.
- [13] G.YANG. “Large-Scale Magnetorheological Fluid Damper for Vibration Mitigation: Modelling, Testing and Control”. PhD dissertation. University of Notre Dame, 2001.
<http://www.plastunivers.com/tecnicahemeroteca/ArticuloCompleto.asp>



[14] http://ebookbrowse.com/2-miguel-cupich-et-al-amortiguadores-pdf-d78882632www.icaei.es/publicaciones/anales_get.php?id=290

[15] http://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2003/02apr_robotblood/

[16] Fernández Fernández J., “Las Redes Neuronales Artificiales” 2008, Ed. Netbiblio

[17] Hilera J. y Martínez V. “Redes Neuronales Artificiales. Fundamentos, modelos y aplicaciones” 1995.

[18] Castillo E. y Cobo A. “Introducción a la redes funcionales con aplicaciones: un nuevo paradigma neuronal”, Paraninfo 1999

[19] Moreno A. y Alonso J. “Aprendizaje automático” Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, 1994

[20] Rojas R., “Neural Network”, Neural Networks, Springer-Verlag, Berlin, 1996

[21] Gołda A., Katedra Elektroniki AGH, 2005.
<http://www.isbn.org/standards/home/isbn/digitalworld.asp>

ANEXO A

A.1. Introducción: Simulador Java-NNS

JavaNNS es el sucesor de SNNS. Está basado en el kernel computacional con un nuevo desarrollo y una cómoda interfaz gráfica de usuario escrita en Java. Es compatible con SNNS aunque la independencia de la plataforma es mayor.

Además de las características del SNNS, JavaNNS ofrece la posibilidad de vincular los navegadores HTML por lo que hace posible acceder al manual del usuario (disponible en HTML) o, opcionalmente, a un *coursebook* de redes neuronales directamente desde el programa.

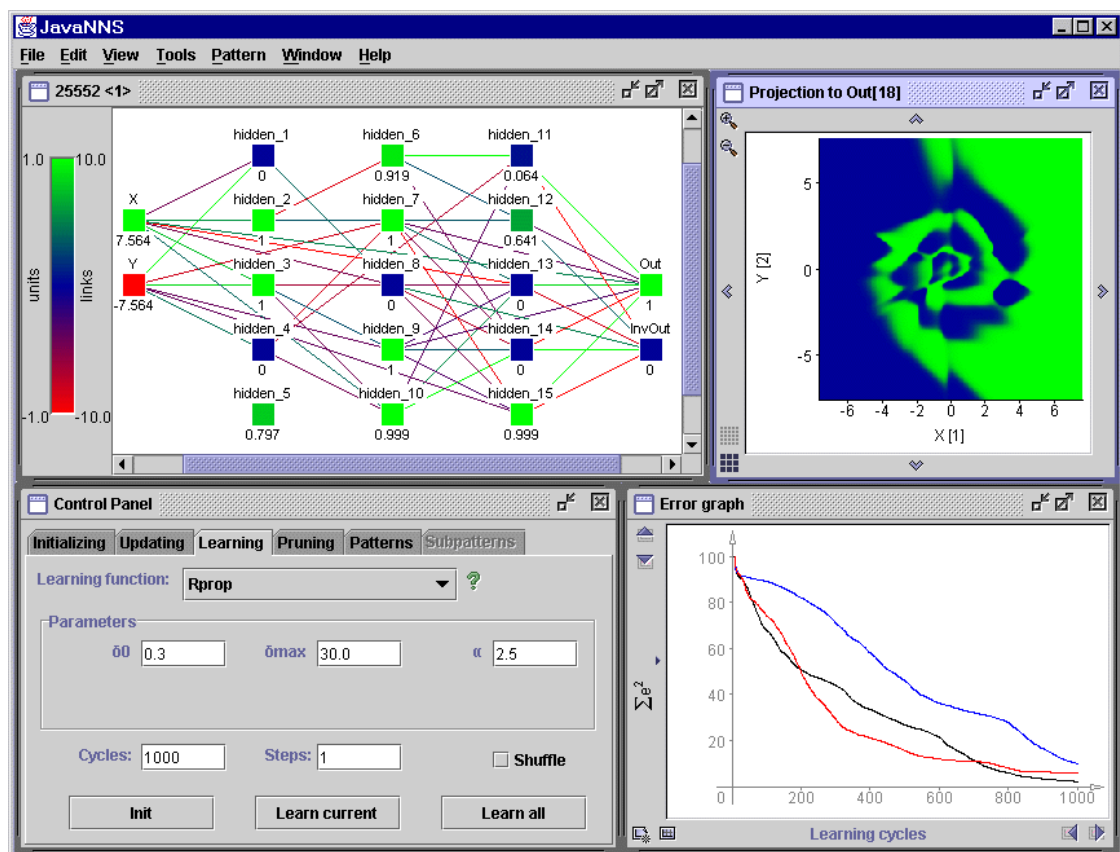


Figura A. 1 Interfaz gráfico JavaNNS

Dicho software ha sido desarrollado por el Departamento de Arquitectura de los Computadores de la Universidad de Tübingen.

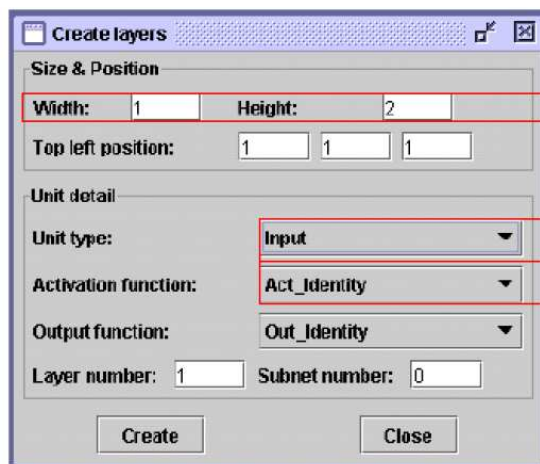
A.2. MANUAL: SIMULADOR JAVA-NNS

A.2.1. Crear una red neuronal MLP

- Crear las capas de la red

[File] → [New]

[Tools] → [Create] → [Layers...]



Se indica el número de filas (*Height*) y columnas (*Width*) de la capa (de entrada, oculta o de salida)

Se elige el tipo de neurona y la función de activación. Si es “*input*”, la función de activación es la **función identidad**.

Como función de salida: lo más habitual es usar función identidad.

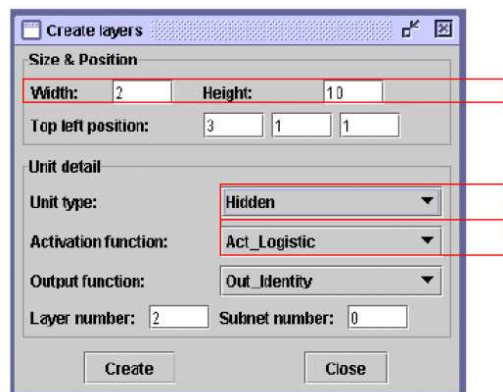
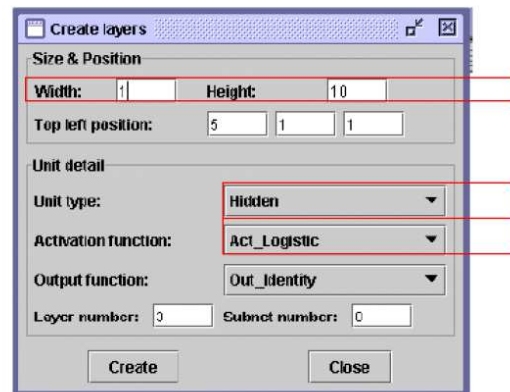
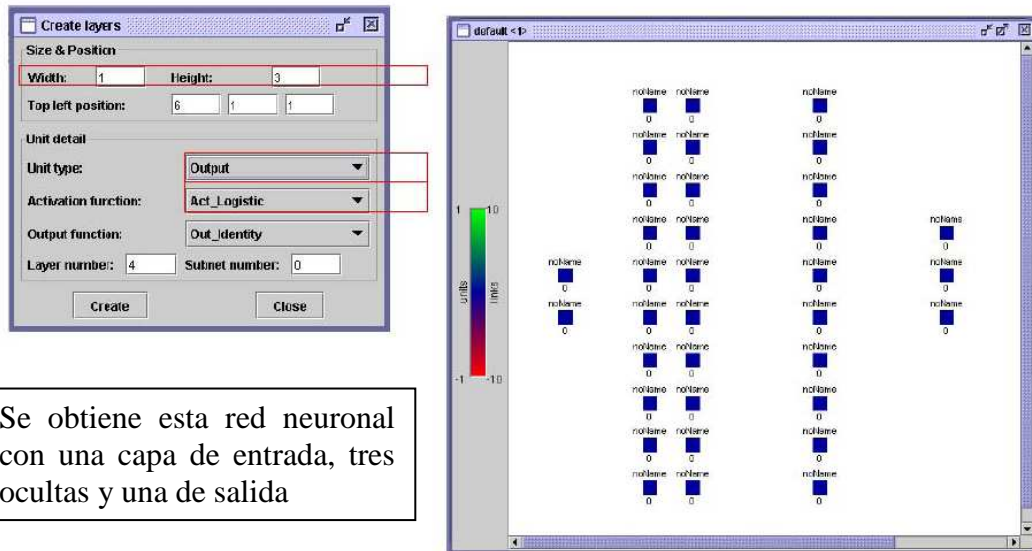



Figura A. 2 Crear capas de la red

En neuronas de la capa oculta (*hidden*) y de salida se puede elegir como función de activación, por ejemplo, la función logística.

Como función salida lo más habitual es elegir la función identidad.



Se obtiene esta red neuronal con una capa de entrada, tres ocultas y una de salida

Figura A. 3 Red neuronal con capa de entrada, salida y tres intermedias

- Crear las conexiones entre capas de la red.

[Tools] → [Create] → [Connections...]

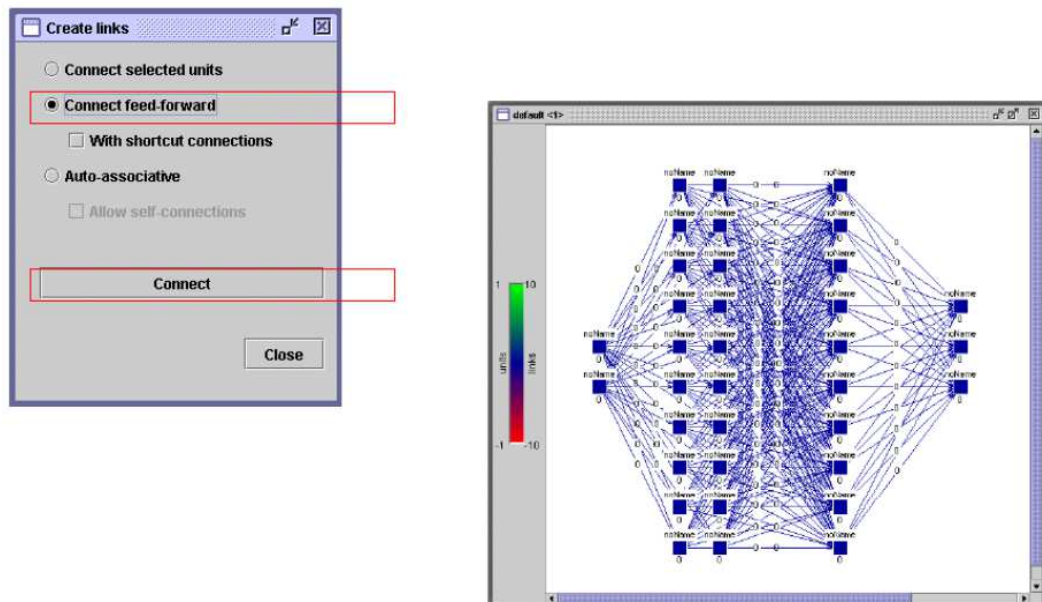


Figura A. 4 Creación de conexiones entre capas de la red

A.2.2. Editar las unidades (neuronas)

Seleccionar con el ratón una o varias neuronas y dar al botón derecho o ir a *Edit – Units properties*. Se abre el siguiente panel:

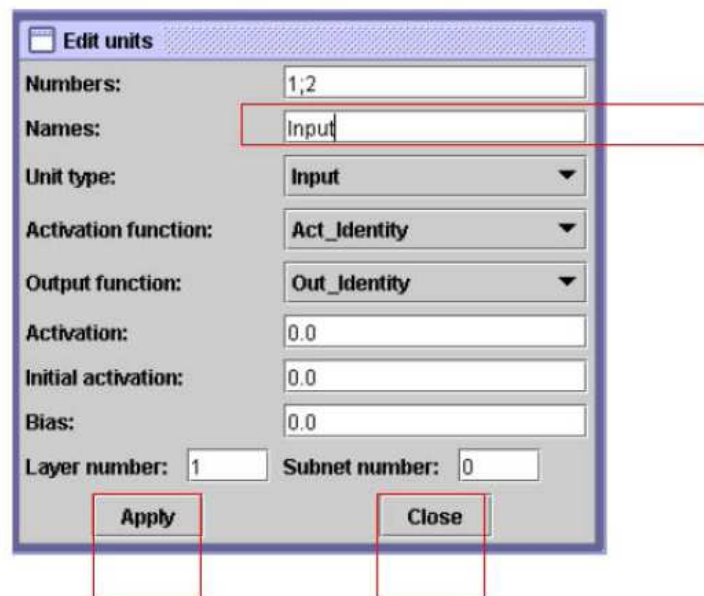


Figura A. 5 Editar neuronas

Aquí se puede cambiar el nombre de las neuronas.

También se pueden editar las etiquetas que se verán para cada neurona. Y seleccionar si se desean ver links, pesos, etc.

Para ello, ir a:

[View] → [Display Setting]

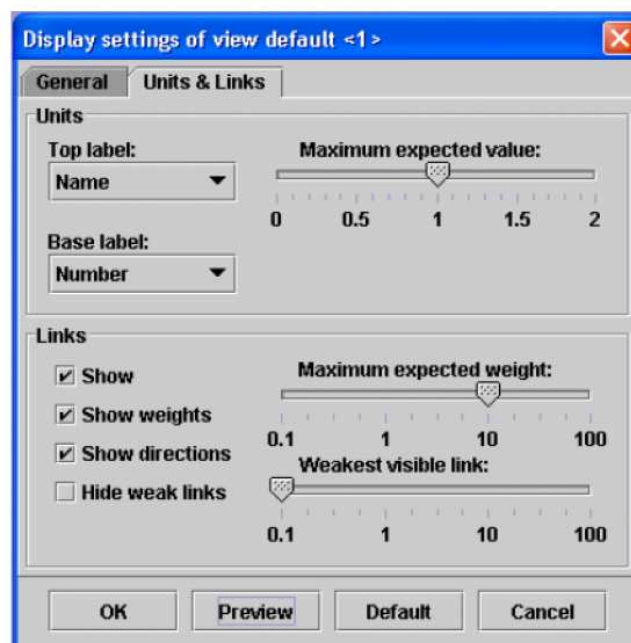


Figura A. 6 Cambiar nombre de las neuronas

A.2.3. Guardar la red creada

[File] → [SAVE AS] Dar un nombre, usando extensión **.net**.

A.2.4. Crear un fichero con patrones de entrenamiento y otro de Validación.

El fichero con los patrones debe estar en un fichero texto, con el encabezado indicado en la figura. (Copiar exactamente igual modificando únicamente *No of patterns, input unit and output units*).

Cada columna es una variable de entrada o salida. Están separadas por un espacio.

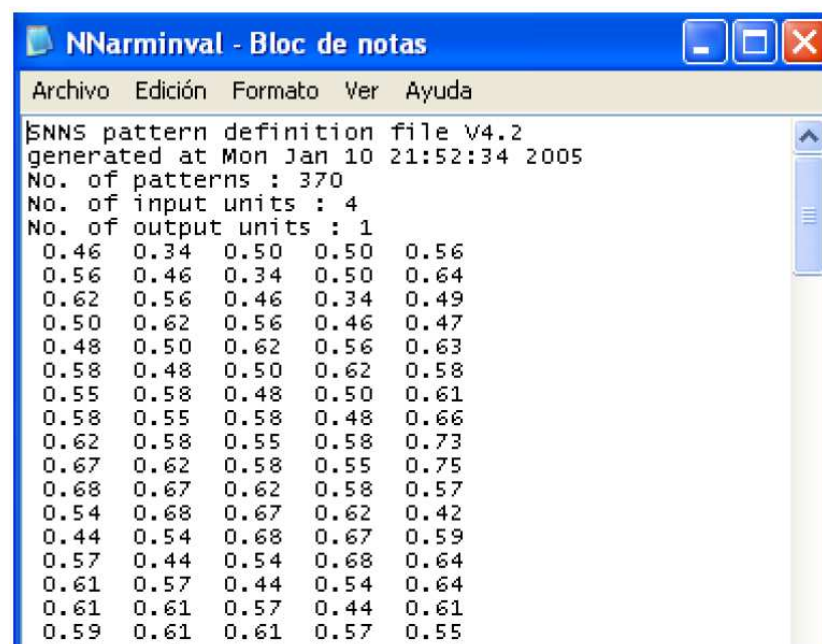


Figura A. 7 Fichero con patrones de entrenamiento y validación

Después de crear los ficheros **.txt** se abren desde [FILE] [OPEN] y se guardan en [FILE] [SAVE DATA] usando la extensión **.pat**. Una vez generados los ficheros **.pat**, se abren desde [FILE] [OPEN]. Deben aparecer los nombres en el menú superior de la pantalla.

A.2.5. Entrenar y validar la red

- Inicializar los pesos de forma aleatoria

[Tools] → [Control]

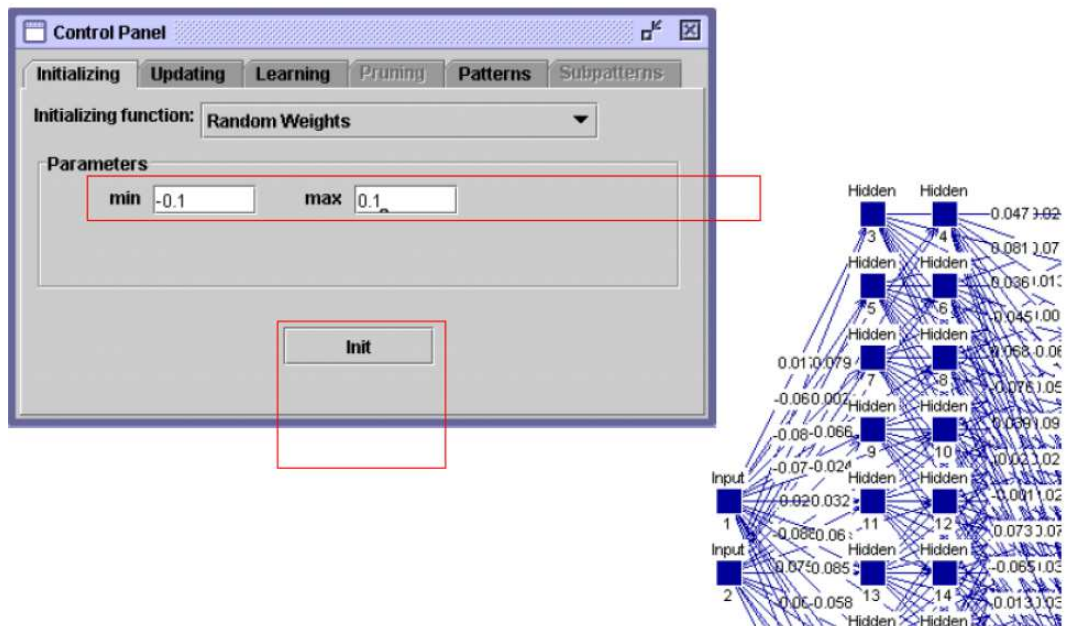


Figura A. 8 Inicialización de los pesos de forma aleatoria

- Orden para calcular las activaciones

Lo mejor es usar *Topological order*. Significa que las activaciones se calculan primero para la capa de entrada, luego para las ocultas según su orden en la red, y por último, las de la capa de salida.

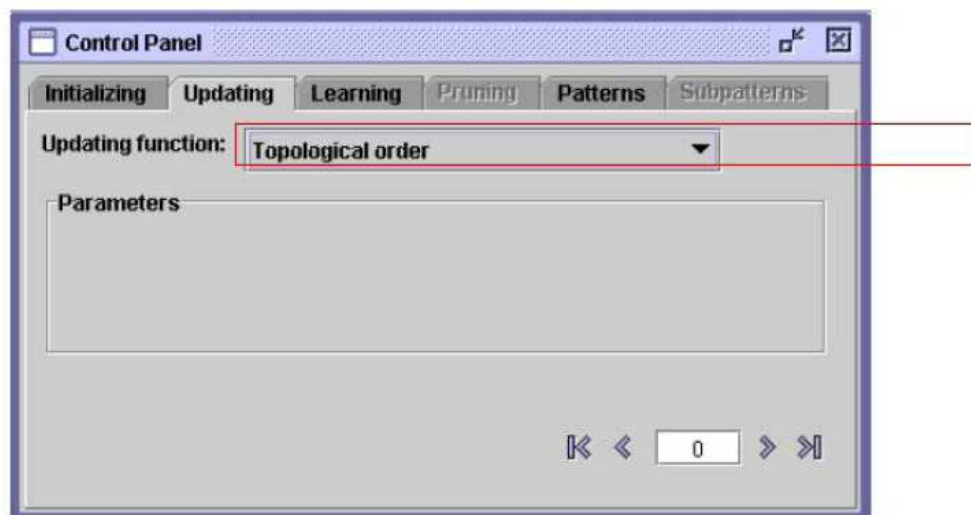


Figura A. 9 Topological order

- Seleccionar los patrones de entrenamiento y validación que ya están cargados

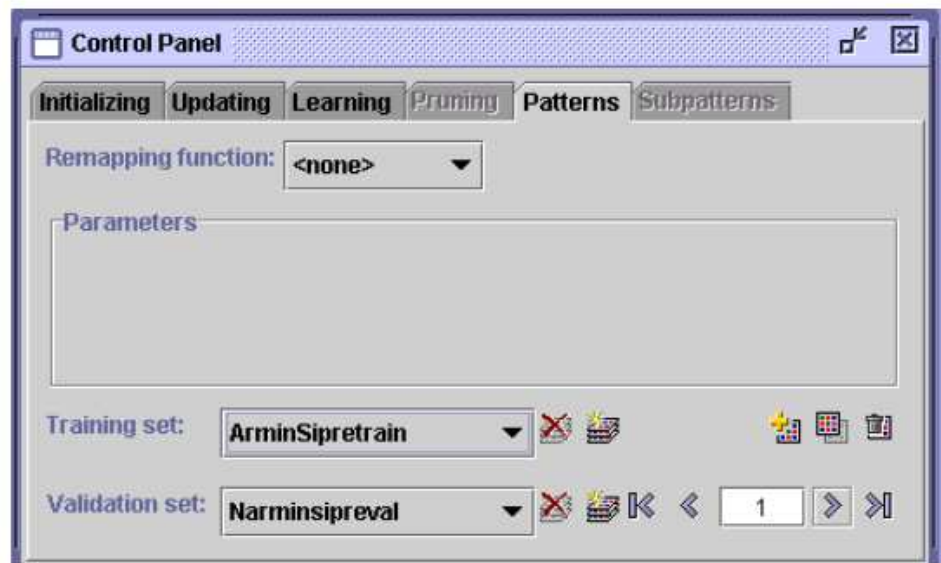


Figura A. 10 Selección de patrones de entrenamiento y validación cargados

- Elegir el algoritmo para entrenar la red

Para entrenar la red los algoritmos más conocidos son *Backpropagation* y *BackpropagationMomentum*. Para entrenar de forma “batch”, es decir, actualizando los pesos una vez que han pasado todos los patrones de entrenamiento, se puede usar la versión del algoritmo para este modo *Batch*: algoritmo *BatchBackpropagation*.

A continuación se indica el significado de los parámetros usados en estos algoritmos.

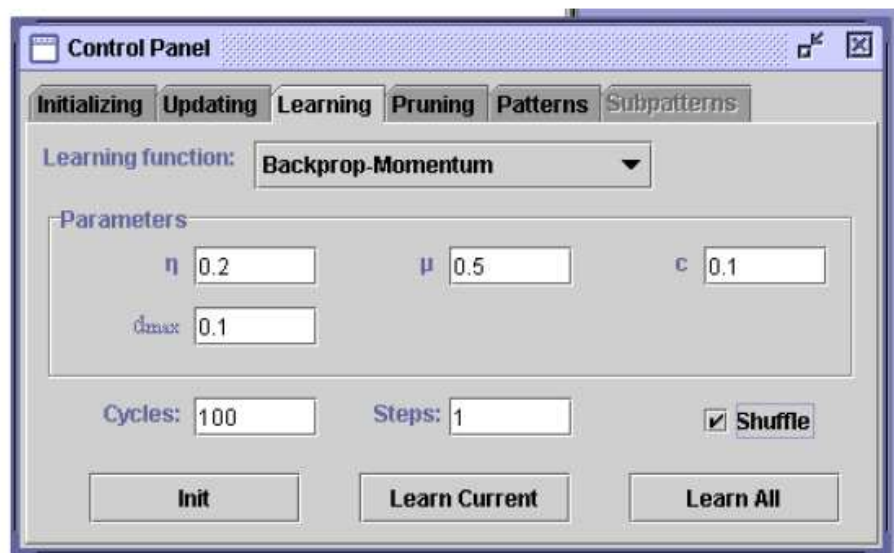


Figura A. 11 Parámetros usados en el algoritmo *BackpropagationMomentum*

Las **variables** $\eta = 0, 0.1, \dots, 1$. y $\mu = 0, \dots, 1$ son los parámetros del algoritmo.

D_{máx} indica el valor del error que ya no es retropropagado. Es habitual seleccionar 0.1.

Significa que los errores en la neurona de salida j , que son calculados como $d_j = t_j - o_j$ que sean $d_j < 0.1$ serán iguales a $d_j = 0$. Y los $d_j > 0.9$ serán iguales a $d_j = 1$. Debe usarse conjuntamente con la variable c .

C es un valor que evita el problema conocido como “flat spots” de la superficie de error.

Cuando los errores son cercanos a 0 o a 1, la derivada tiende a cero y esto hace que el error propagado hacia atrás sea pequeño. Se suele usar $c = 0.1$, valor que es añadido a la derivada cuando $d_j = 0$ o $d_j = 1$.

Cycles es el número de épocas de entrenamiento. Después de realizarlas se hace una validación. Steps dejarlo en 1.

Shuffle indica que los patrones pasarán de forma aleatoria cuando se hace entrenaminento uno a uno.

Init inicia el entrenamiento.

Learn current realiza entrenamiento pasando los patrones uno a uno. Cada vez que pasa un patrón propaga errores hacia atrás.

Learn all realiza entrenamiento “batch”, es decir pasan todos los patrones y luego propaga errores.

Para empezar a entrenar la red pulsar una de las dos opciones: *learn current* o *learn all*.

Otro algoritmo que también es utilizado para entrenamiento tipo de batch es el algoritmo “Resilient Propagation (REPROP)”. Es una versión del *backpropagation* mejorada. Los parámetros de este algoritmo se pueden ver en el manual SNNS. Por defecto se pueden dejar estos valores que son habituales.

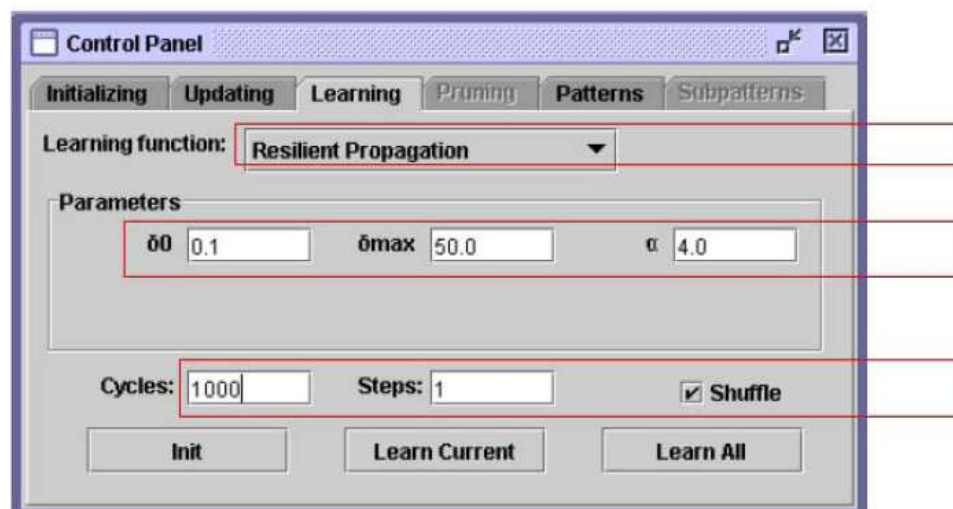
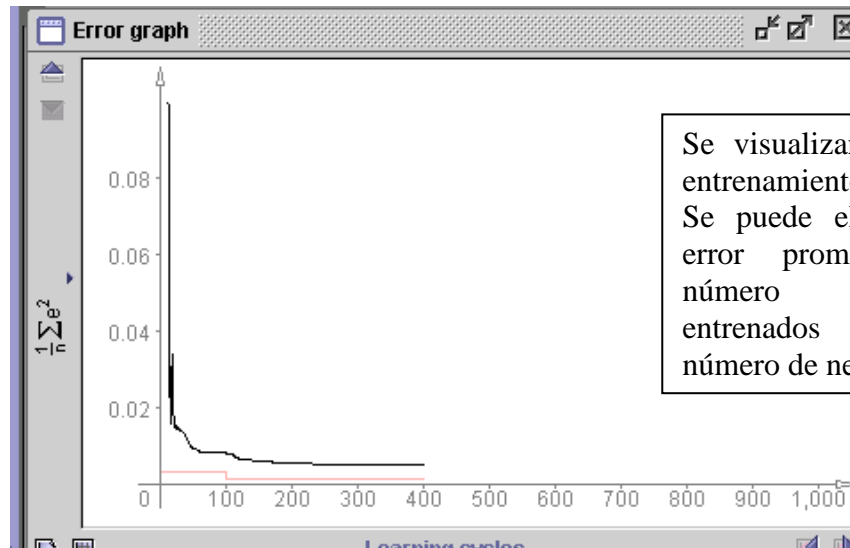


Figura A. 12 Valores usados por defecto

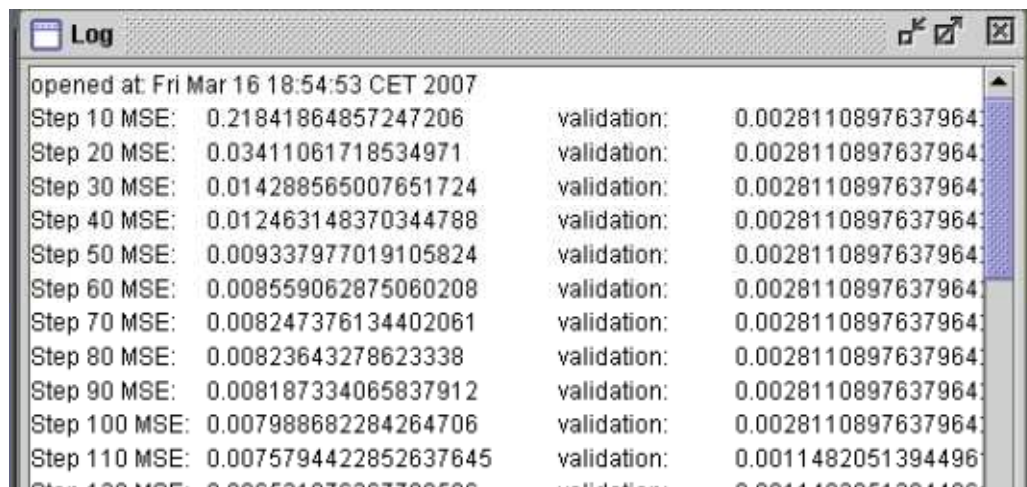
A.2.6. Visualizar el error

[VIEW] [ERROR GRAPH]



Se visualizan los errores de entrenamiento y validación. Se puede elegir error total, error promediado por el número de patrones entrenados y error por el número de neuronas de salida

[VIEW] [LOG]

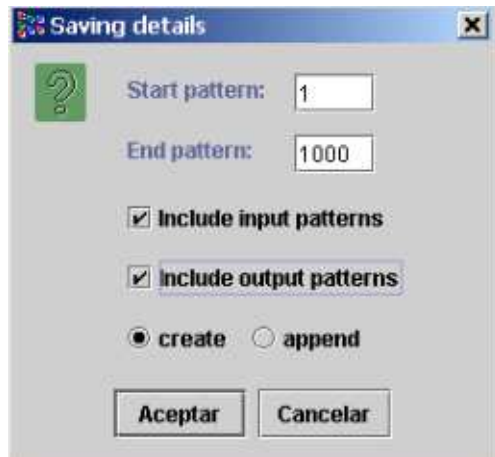


The 'Log' window displays a table of training and validation data. The table has two columns: 'MSE' (Mean Squared Error) and 'validation'. The data is organized into steps, with each step showing the MSE and validation error. The training error (MSE) decreases significantly over the first 100 steps, while the validation error remains relatively stable and low.

Step	MSE	validation
Step 10	0.21841864857247206	0.0028110897637964
Step 20	0.03411061718534971	0.0028110897637964
Step 30	0.014288565007651724	0.0028110897637964
Step 40	0.012463148370344788	0.0028110897637964
Step 50	0.009337977019105824	0.0028110897637964
Step 60	0.008559062875060208	0.0028110897637964
Step 70	0.008247376134402061	0.0028110897637964
Step 80	0.00823643278623338	0.0028110897637964
Step 90	0.008187334065837912	0.0028110897637964
Step 100	0.007988682284264706	0.0028110897637964
Step 110	0.0075794422852637645	0.0011482051394496
Step 120	0.006564076267306508	0.0011482051394496

A.2.7. Grabar los resultados

[FILE] [SAVE DATA]



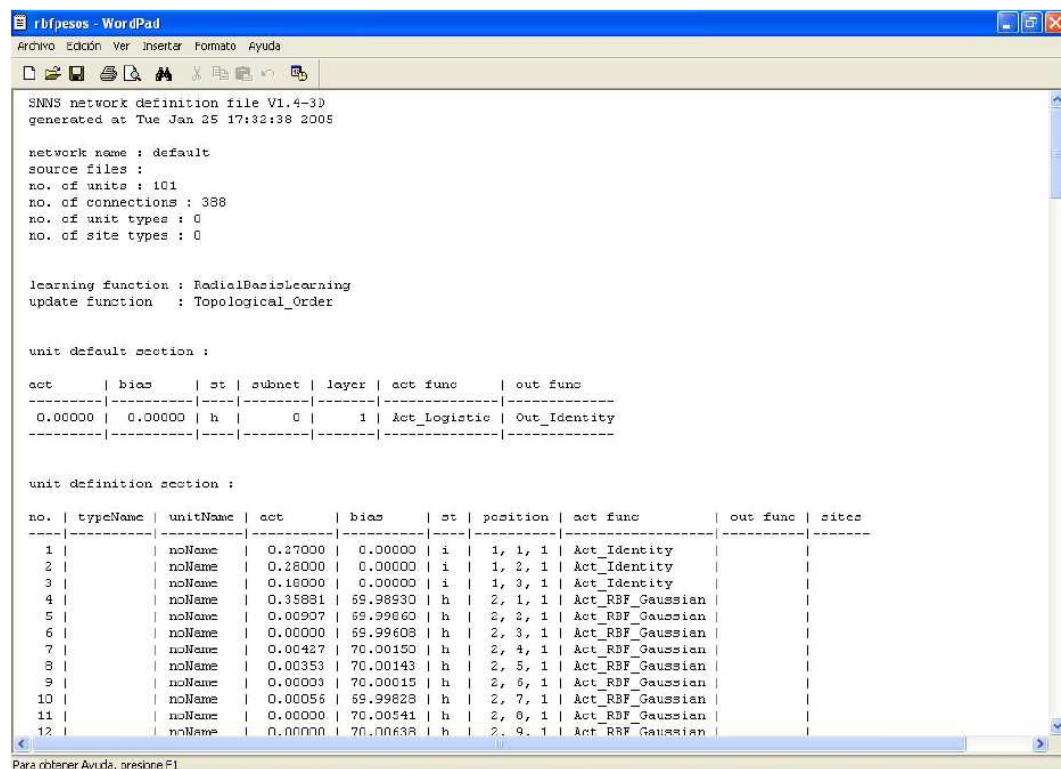
Se guarda con extensión **.res**.

Permite guardar el valor de salida estimado con la red neuronal, pero también se pueden guardar los valores de las entradas y salidas. El fichero se puede abrir con un editor de texto (word pad por ejemplo) o con el editor de matlab.

También se puede guardar la red entrenada con extensión **.net**. Para ello ir a “*save as*”.

Después se cambia la extensión a **.txt** y se pueden visualizar pesos, activaciones, etc.

[FILE] [SAVE AS]

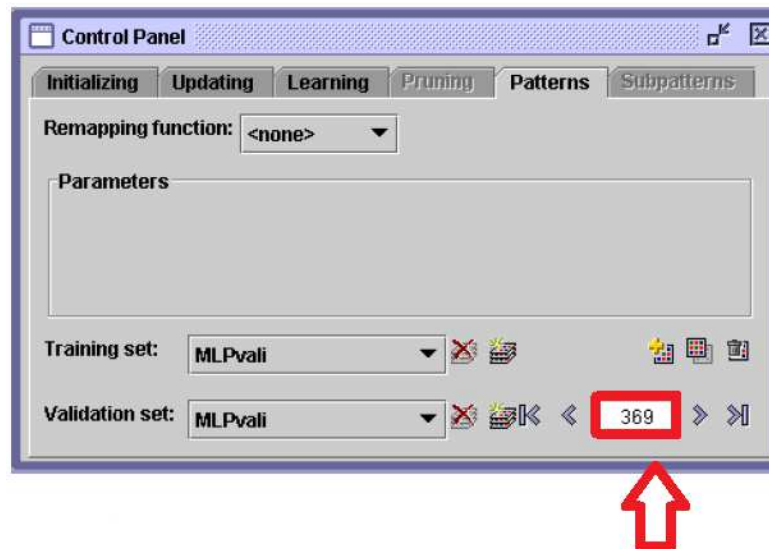


NOTA: Es recomendable crear también un fichero con patrones para realizar **TEST**. Esto es en [TOOLS] [ANALYZER].

A.2.8. Analizar nuevos datos

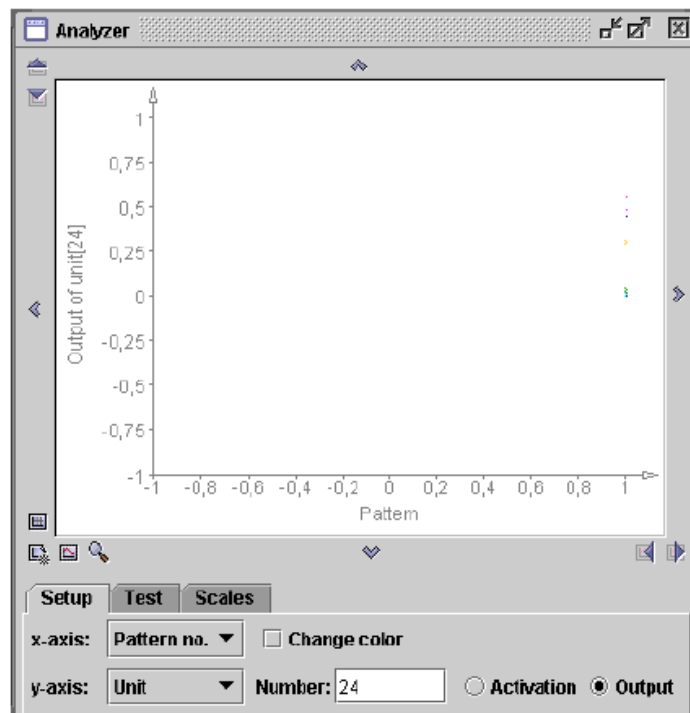
Se debe leer nuevamente el fichero con los datos que se quieren analizar. Igual que se hizo con los patrones de entrenamiento y validación.

En Pattern se selecciona ese conjunto de datos como conjunto de patrones de entrenamiento. Debe estar seleccionado también el último patrón, es decir, debe aparecer indicado el número de datos que se tiene. Por ejemplo, está indicado en la figura 369, el fichero que se va a analizar tiene 369 datos.



Luego, se selecciona:

[TOOLS] [ANALYZER]



En este panel se selecciona en:

Setup : x-axis : pattern no
 y-axis: unit Number: el número de la neurona de salida
 Output para que enseñe la salida de esa neurona.

Test: Steps: el número de patrones (en el ejemplo 369)
 Seleccionado Change pattern
 Se da a Test.

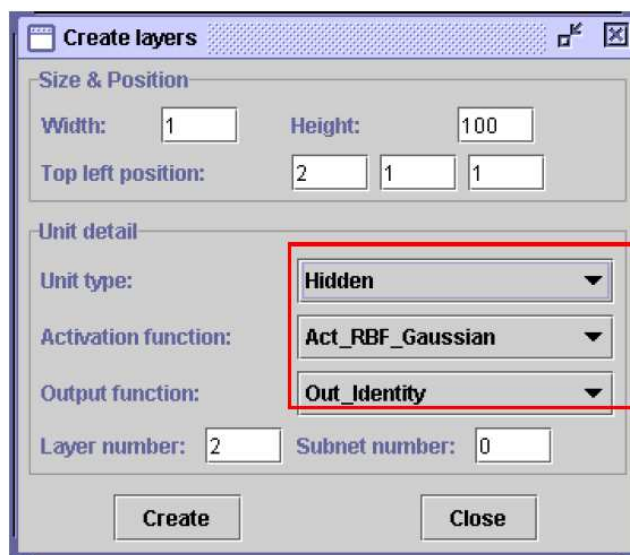
Aparecerán las estimaciones que hace la red para ese conjunto de datos. Se puede grabar igual que antes, en save data.

A.3. Redes de base radial

A.3.1. Crear la red neuronal de RB

La red se crea de manera similar que las redes MLP, teniendo en cuenta que en este caso sólo se tiene una capa oculta.

Todo lo descrito en los apartados A2.1- A.2.4 para redes MLP es válido para estas redes neuronales.



Para las neuronas de la **capa oculta** se elige como función de activación, una función de **base radial**. Por ejemplo la Gaussiana. Como función de salida la identidad.

Las neuronas de la **capa de entrada** tienen como función de activación y de salida la **función Identidad**.

Las neuronas de la **capa de salida** tienen como función de activación la función logística o la función de identidad que añade un bias: **"IdentityPlusBias"**. Como función de salida, la función identidad.

A.3.2. Entrenamiento y validación

- **Cargar los patrones de entrenamiento y validación**

El primer paso debe ser cargar los patrones de entrenamiento y validación. Para ello se procede de la misma forma que para las redes MLP, apartado A.2.4 y A.2.5.

- **Generar aleatoriamente los centros y los anchos de las neuronas de la capa oculta**

En el caso de las redes de base radial es necesario inicializar los centros \mathbf{t}_i de las neuronas de la capa oculta. Recordar que estos centros son vectores de dimensión M (número de neuronas de entrada), y que se tiene un vector \mathbf{t}_i para cada neurona oculta, es decir $i = 1, 2, \dots, H$.

En JavaNNS los centros se consideran como pesos entre las neuronas de entrada con las neuronas de la capa oculta.

Los anchos σ_i de las neuronas de la capa oculta, $i = 1, 2, \dots, H$, se consideran como “bias” de las neuronas de la capa oculta. También deben ser inicializados.

Por último deben inicializarse también los pesos entre las neuronas de la capa oculta y las neuronas de la capa de salida.

Para inicializarlos es necesario cargar los patrones de entrenamiento.

Los distintos métodos para inicializar centros, vías y pesos así como, el algoritmo utilizado para la minimización del error se pueden consultar en el manual SNNS, capítulo 9.